



Università degli Studi di Padova

SCUOLA DI SCIENZE

Dipartimento di Geoscienze

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN GEOLOGIA

E GEOLOGIA TECNICA

**ANALISI SPERIMENTALE E NUMERICA DI
ALCUNI ASPETTI DELLA DINAMICA DEGLI
AMMASSI GRANULARI**

Relatore: Prof. Ing. Paolo Scotton

Correlatore: Dott. Damiano Vescovo

Laureando: Davide Bronca

ANNO ACCADEMICO 2014-2015

A mio zio Sergio.

Abstract

In the present work some aspects of the dynamics of granular masses with reference to phenomena such as debris flows, dense snow avalanches and rock avalanches have been studied. The issue has been addressed experimentally by tests carried out at the Laboratory of Hydrogeology of the University of Padua. The results of the experimental tests have been used for the calibration of a particle numerical model, built to simulate the dynamics of dry granular masses.

The experimental tests have been realized by releasing on the upstream plane of a channel formed by two tiltable planes, a fixed amount of granular material. The slope of the downstream plane has been set in order produce the stopping of the material. Granular materials different in shape, specific weight, particle size distribution have been used.

The evolution of the laboratory tests have been investigated by using a hardware and software system for the three-dimensional photogrammetric survey, which allowed the reconstruction of the shape of the outer surface of the moving granular mass, at choosen instants of time.

The used numerical model solves the dynamics of the granular mass describing the motion of the individual particles with the second dynamics motion equation. The physical parameter essential for the description of the choosen rheology is the friction angle between the granular material and the planes bottom, which has been experimentally determined for the various materials.

Nel presente lavoro di tesi sono stati studiati alcuni aspetti della dinamica degli ammassi granulari con riferimento a fenomeni quali le colate di detriti, le valanghe di roccia e le valanghe primaverili di neve densa. Il tema è stato affrontato sperimentalmente mediante prove realizzate presso il Laboratorio di Idrogeologia dell'Università degli Studi di Padova. I risultati delle prove sperimentali sono stati utilizzati per la taratura di un modello particellare, costruito per simulare la dinamica degli ammassi granulari secchi.

I test sperimentali sono stati realizzati rilasciando sul piano di monte di una canaletta costituita da due piani a pendenza variabile, una quantità stabilita di materiale granulare. La pendenza del piano di valle è stata posta in modo da provocare l'arresto del materiale. Sono stati utilizzati materiali granulari diversi per forma, peso specifico, distribuzione granulometrica. L'evoluzione dei test di laboratorio è stata eseguita utilizzando una strumentazione per il rilievo tridimensionale fotogrammetrico, che permetteva la ricostruzione, ad istanti di tempo stabiliti, della forma della superficie esterna dell'ammasso in movimento.

Il modello numerico utilizzato risolve la dinamica dell'ammasso descrivendo con la seconda equazione della dinamica il moto delle singole particelle che lo costituiscono. Il parametro fisico fondamentale per la descrizione della reologia scelta è l'angolo d'attrito tra il materiale granulare e il fondo della canaletta, che è stato determinato sperimentalmente per i vari materiali.

Errata Corrige

Figura 8.3: Andamento della profondità all'arresto dell'ammasso, adimensionalizzata con la altezza massima iniziale, rispetto alla distanza dal centro della forma tronco-conica, anch'essa adimensionalizzata con la altezza massima iniziale, per il test di Figura 8.2.

Figura 8.3: Andamento della profondità all'arresto dell'ammasso, adimensionalizzata con il raggio della circonferenza di base, rispetto alla distanza dal centro della forma tronco-conica, anch'essa adimensionalizzata con il raggio della circonferenza di base, per il test di Figura 8.2.

Figura 8.5: Andamento della profondità all'arresto dell'ammasso, adimensionalizzata con la altezza massima iniziale, rispetto alla distanza dal centro della forma tronco-conica, anch'essa adimensionalizzata con la altezza massima iniziale, per il test eseguito con un tronco-cono con superficie inclinata di 50 gradi. Sono mostrati i profili numerici ottenuti con due diversi coefficienti d'influenza (C_{inf}).

Figura 8.5: Andamento della profondità all'arresto dell'ammasso, adimensionalizzata con il raggio della circonferenza di base, rispetto alla distanza dal centro della forma tronco-conica, anch'essa adimensionalizzata con il raggio della circonferenza di base, per il test eseguito con un tronco-cono con superficie inclinata di 50 gradi. Sono mostrati i profili numerici ottenuti con due diversi coefficienti d'influenza (C_{inf}).

Indice

1	Introduzione	1
2	Fotogrammetria	3
2.1	Introduzione	3
2.2	La fotogrammetria digitale	3
2.3	Fondamenti di ottica geometrica	4
2.4	Orientamento esterno	10
2.4.1	Le equazioni di collinearità	11
2.4.2	Orientamento esterno di un singolo fotogramma (space resection)	12
2.4.3	Orientamento combinato di una coppia di immagini	13
2.4.4	La matrice di rotazione	14
2.5	Bundle Block Adjustment	16
2.5.1	Least square adjustment (metodo ai minimi quadrati)	16
2.6	Calibrazione di camere digitali non metriche (self-calibration)	18
2.6.1	Fondamenti analitici	18
2.6.2	Ottimizzazione del self-calibration bundle adjustment	19
2.6.3	I parametri addizionali (AP)	20
2.7	La fotogrammetria terrestre per la modellazione 3D	20
2.8	Conclusioni	21
3	Configurazione Sperimentale	23
3.1	Introduzione	23
3.2	La canaletta sperimentale	23
3.2.1	La canaletta sul piano di monte	24
3.2.2	Il contenitore di forma troncoconica	24
3.2.3	Il deviatore di flusso	24
3.3	Apparato fotogrammetrico	27
3.3.1	Le videocamere	27
3.3.2	Gli illuminatori	30
3.3.3	La luce disponibile per i fotogrammi	30
3.4	Sistema d'Acquisizione	30
3.4.1	Il software LabView	31
3.4.2	Software Measurement&Automation	33
4	Calibrazione degli obiettivi	35
4.1	Introduzione	35
4.2	Target retroriflettenti	35
4.3	Procedura di calibrazione	36
4.3.1	Fase 1: acquisizione dei fotogrammi	36

4.3.2	Fase 2: caricamento dei fotogrammi in Australis	36
4.3.3	Fase 3: risultati dal processamento automatico	37
4.3.4	Condizioni di ripresa ottimali	38
4.4	Risultati della calibrazione	38
5	Ricostruzioni 3D della Canaletta	41
5.1	Introduzione	41
5.2	Sistemazione dei Marker retroriflettenti e dei Control Points	41
5.3	Sistema di riferimento sulla canaletta	42
5.4	Disposizione delle videocamere	43
5.5	Ricostruzione fotogrammetrica della canaletta	43
5.5.1	Doppio piano inclinato	43
5.5.2	Doppio piano inclinato con canale	46
5.5.3	Doppio piano inclinato con canaletta e deviatore	47
6	I materiali impiegati nei test	49
6.1	Introduzione	49
6.1.1	Descrizione dei materiali	49
6.2	Parametri fisici d'interesse	51
6.2.1	Densità	51
6.2.2	Porosità	51
6.2.3	Compattamento	52
6.2.4	Determinazione dell'angolo d'attrito tra il materiale granulare ed il fondo della canaletta	53
7	Simulazioni	57
7.1	Introduzione	57
7.2	Prove su pendio aperto	57
7.2.1	Preparazione dei test	57
7.2.2	Modalità di esecuzione dei test	57
7.2.3	Considerazioni generali	58
7.3	Prove su pendio incanalato	58
7.3.1	Preparazione dei test	58
7.3.2	Modalità di esecuzione dei test	58
7.4	Prove su pendio incanalato con deviatore	60
7.4.1	Preparazione dei test	60
7.4.2	Modalità di esecuzione dei test	60
7.5	Elaborazioni fotogrammetriche	60
7.5.1	Elaborazioni ArcGIS	62
7.6	Osservazioni sulle prove effettuate	62
7.6.1	Prove su pendio aperto	62
7.6.2	Prove su pendio incanalato	70
7.7	Situazioni reali	80
7.8	Conclusioni	80
8	Applicazioni numeriche	83
8.1	Introduzione	83
8.2	Il modello fisico-numerico	83
8.2.1	Metodi per la soluzione dell'equazione del moto	84

8.2.2	Le forze applicate alle particelle	85
8.2.3	La forza di gravità sulle particelle	87
8.2.4	La forza d'attrito Coulombiana	88
8.2.5	La forza di resistenza aerodinamica	88
8.3	Il problema della ricostruzione dell'ammasso - il metodo del raggio d'influenza.	88
8.4	Preparazione ai test numerici	89
8.5	Simulazione di un ammasso tronco-conico su piano orizzontale.	90
8.5.1	Tronco-cono con inclinazione di 40°	90
8.5.2	Tronco-cono con inclinazione di 50°	91
8.6	Simulazioni su pendio aperto	94
9	Conclusioni	105

Elenco delle figure

2.1	Esempio di CCD a 10,2 Megapixel.	4
2.2	Caratteristiche geometriche delle lenti: A equi-convessa; B piano-convessa; C a menisco positivo; D equi-concava; E piano concava.	5
2.3	Formazione delle immagini nelle lenti positive.	6
2.4	Rifrazione di un raggio luminoso che attraversa una lastra di vetro a facce parallele.	7
2.5	Schema di formazione dell'immagine per una lente rappresentata dai suoi punti nodali.	8
2.6	Punto principale di autocollimazione e distanza principale.	9
2.7	Deviazione del centro dell'asse ottico dalla congiungente delle marche fiduciali, sul piano dell'immagine.	10
2.8	Distorsione radiale e tangenziale delle lenti.	10
2.9	Definizione dei parametri di orientamento esterno.	11
2.10	Condizione di complanarità.	14
2.11	Definizione delle 3 rotazioni attorno agli assi di riferimento (www.geodetic.com).	15
2.12	Visualizzazione grafica degli angoli ottenuti dalle rotazioni attorno all'asse x (elevation), y (azimuth), z (roll) rispettivamente.	16
3.1	La canaletta sperimentale utilizzata in laboratorio per la generazione di fenomeni di dinamica di ammassi granulari secchi.	24
3.2	I clisimetri utilizzati per la misura della inclinazione del piano di monte e di valle: in alto, i due clisimetri montati sulla struttura di sostegno del piano di monte (a destra e a sinistra del piano di monte); in basso, i due clisimetri montati sulla struttura di sostegno del piano di valle.	25
3.3	Il canale a sezione rettangolare ricavato sul piano di monte e la paratoia a rimozione manuale.	26
3.4	Il contenitore troncoconico utilizzato nelle prove su pendio aperto.	26
3.5	Il deviatore di flusso installato sul piano di valle della canaletta sperimentale.	27
3.6	L'impalcatura di sostegno delle videocamere e degli illuminatori.	28
3.7	Una videocamera e il dispositivo di supporto a movimentazione tridimensionale.	28
3.8	Le videocamere modello Ace GigE Basler utilizzate nelle realizzazioni sperimentali.	29
3.9	Specifiche delle videocamere Basler acA 1600-20 gm/gc.	29
3.10	La scheda National Instrument utilizzata per la gestione della contemporanea attivazione delle videocamere.	31
3.11	Interfaccia software del codice d'acquisizione e archiviazione delle immagini.	32

4.1	Esempio di marker retroriflettente utilizzato in abbinamento con il software Australis per la determinazione dei parametri di calibrazione delle ottiche delle videocamere e della macchina fotografica Canon Powershot Pro1.	36
4.2	Sistemazione dei marker retroriflettenti nella configurazione che ha dato i migliori risultati,	38
5.1	Esempio di Control Point, realizzato in proprio, di dimensioni pari ai bersagli dei Marker Australis.	41
5.2	A sinistra: posizione del sistema di riferimento sul piano di valle della canaletta. A destra: vista della canaletta con evidenziazione del sistema di riferimento.	42
5.3	Punti referenziati dal software Australis, elaborando le immagini acquisite con la macchina fotografica Canon. Oltre ai punti si nota il sistema di riferimento (in rosso) e le varie posizioni spaziali da dove sono state scattate le foto. . . .	44
5.4	Punti referenziati dal software Australis, elaborando le immagini acquisite con la macchina fotografica Canon. Oltre ai punti si nota il sistema di riferimento (in rosso) e le varie posizioni spaziali da dove sono state scattate le foto. . . .	45
5.5	Nell'immagine a sinistra, il raster della canaletta ottenuto dall'elaborazione delle foto acquisite con la macchina fotografica Canon. A destra la canaletta ottenuta dall'elaborazione delle foto acquisite dalle videocamere Basler Ace GigE.	45
5.6	Referenziazione del bordo superiore del canale, in questa visualizzazione oltre al punto è evidenziato anche il codice identificativo.	46
5.7	Raster del doppio piano inclinato con canale.	47
5.8	Raster del doppio piano inclinato con canale e deviatore.	47
6.1	Ghiaia grossa.	49
6.2	Ghiaia fine.	50
6.3	Le Zeoliti utilizzate nei test sperimentali e i traccianti di colore bianco in PVC.	50
6.4	A sinistra, dettaglio sui grani che costituiscono il materiale zeolitico, A destra il deposito di una valanga di neve granulare.	51
6.5	Cilindro graduato con ghiaia fine ,	52
6.6	La scatola di taglio utilizzata per la misurazione dell'angolo d'attrito tra il materiale ed il fondo della canaletta.	53
6.7	Il carico verticale all'interno della scatola di taglio è stato ottenuto sia modificando il peso di materiale granulare nella scatola, come nella figura a sinistra e nella figura in centro, sia utilizzando dei carichi noti, come nella figura a destra.	54
6.8	Grafico che riporta i risultati delle prove di attrito sul fondo per la ghiaia grossa con relativo errore associato ad ogni punto ed al valore dell'angolo d'attrito.	55
6.9	Grafico che riporta i risultati delle prove di attrito sul fondo per la ghiaia fine con relativo errore associato ad ogni punto ed al valore dell'angolo d'attrito.	55
6.10	Grafico che riporta i risultati delle prove di attrito sul fondo per le zeoliti con relativo errore associato ad ogni punto ed al valore dell'angolo d'attrito. . . .	56
7.1	Il contenitore tronco-conico caricato con ghiaia grossa, posizionato sul piano di monte	58
7.2	Il deposito iniziale della ghiaia grossa per la prima prova, a sinistra, e , a destra, il deposito in occasione della ripetizione della prova.	59

7.3	Modalità di caricamento della ghiaia fine e del materiale zeolitico nelle prove su pendio incanalato.	59
7.4	Due fotogrammi ritenuti significativi nella prova eseguita su pendio incanalato con deviatore di flusso: a sinistra, l'istante in cui il materiale occupa l'intero canale; a destra, l'istante in cui il materiale impatta contro il deviatore di flusso.	60
7.5	L'immagine è un esempio di ciò che si ottiene ultimata l'elaborazione fotogrammetrica. Si notano i punti coordinati (bandierine), importati da Australis, con il loro codice identificativo.	61
7.6	Fotogrammi ottenuti dalla videocamera Basler 1, focale 6 mm, durante la prova su pendio aperto con ghiaia grossa.	63
7.7	Il fotogramma a sinistra è stato ottenuto dalla videocamera Basler 1, focale 6mm, il fotogramma a destra dalla Basler 4, focale 8mm, durante la prova su pendio aperto con ghiaia grossa.	63
7.8	Fotogrammi ottenuti con la videocamera Basler1, focale 6mm. In rosso sono stati cerchiati i clasti rimasti nel pendio di monte	64
7.9	A sinistra il deposito finale fotografato con la videocamera Canon PowerShot Pro1. Il rettangolo rosso tracciato sopra il deposito delimita l'immagine di dettaglio a destra.	64
7.10	Evoluzione temporale del volume occupato dall'ammasso negli istanti elaborati fotogrammetricamente, nella prova su pendio aperto con ghiaia grossa. L'errore medio stimato su base fotogrammetrica è pari a $0.31dm^3$. Per il valore rappresentato dal punto rosso l'errore è significativamente maggiore di quello medio.	65
7.11	DTM dell'ammasso sovrapposto al DTM della canaletta nell'istante temporale $t = 2.07s$, per la prova su pendio aperto con ghiaia grossa.	66
7.12	Confronto tra le due prove ufficiali nel caso di pendio aperto con ghiaia grossa. Si nota come nella prova ripetuta (a destra) l'ammasso si sia depositato leggermente più a monte.	66
7.13	Il deposito finale ottenuto dal test svolto con una piccola quantità di zeoliti all'interno dell'ammasso costituito da ghiaia grossa su pendio aperto.	67
7.14	Evoluzione temporale del volume occupato dall'ammasso negli istanti elaborati fotogrammetricamente, nella prova su pendio aperto con ghiaia fine. L'errore medio stimato su base fotogrammetrica è pari a $0.26dm^3$. Per il valore rappresentato dal punto rosso l'errore è significativamente maggiore di quello medio.	68
7.15	Istanti iniziali della evoluzione del materiale zeolitico su pendio aperto. I fotogrammi sono stati ripresi dalla videocamera Basler 1, focale 6mm.	68
7.16	Posizione e morfologia del deposito dell'ammasso zeolitico nelle prove su pendio aperto.	69
7.17	Evoluzione temporale del volume occupato dall'ammasso negli istanti elaborati fotogrammetricamente, nella prova su pendio aperto con zeoliti. L'errore medio stimato su base fotogrammetrica è pari a $0.32dm^3$	70
7.18	Immagini dei depositi finali della prova eseguita su pendio aperto con zeoliti e della sua ripetuta.	70

7.19	Le immagini sono state estratte dal video trasversale con ottica parallela al piano di monte, considerando la forma iniziale dell'ammasso si nota come i primi clasti ha mettersi in moto siano quelli adiacenti alla paratoia mobile e posti in superficie. Questo accade perchè in quella zona, alla rimozione della paratoia, si ha il massimo gradiente sulla superficie libera. Dopo, circa 1s, la situazione è quella nell'immagine a destra, il profilo dell'ammasso tende a disporsi parallelamente all'inclinazione del pendio mentre sul fondo le particelle rimangono sostanzialmente immobili.	71
7.20	Alcuni istanti elaborati fotogrammetricamente dell'evoluzione temporale della ghiaia grossa su pendio incanalato.	72
7.21	Confronto tra le prove incanalate per la ghiaia grossa.	73
7.22	Dall'immagine a sinistra si nota come tutta la superficie superiore dell'ammasso risenta immediatamente della rimozione della paratia, Osservando il profilo si nota come si formi un'onda che tende a propagarsi verso valle rilassandosi per l'azione del gradiente sulla superficie libera. Nell'immagine a destra un istante finale quando il picco dell'onda ha già abbandonato la zona inquadrata.	74
7.23	Prova eseguita con materiale zeolitico incanalato senza deviatore. Fotogramma ripreso dalla videocamera Basler 1, focale 6mm. Lungo le pareti interne del canale sono visibili scie di traccianti.	74
7.24	Il deposito finale nella prova su pendio incanalato con zeoliti e nella ripetuta.	74
7.25	A sinistra, l'evoluzione del volume occupato dall'ammasso nelle prove con ghiaia grossa su pendio incanalato; a destra, nel caso di ghiaia fine. L'errore medio stimato su base fotogrammetrica è pari a 0.20 dm^3 Per il valore rappresentato dal punto rosso l'errore è significativamente maggiore di quello medio.	75
7.26	L'evoluzione del volume occupato dall'ammasso nelle prove con materiale zeolitico su pendio incanalato. L'errore medio stimato su base fotogrammetrica è pari a 0.19 dm^3 Per il valore rappresentato dal punto rosso l'errore è significativamente maggiore di quello medio.	75
7.27	Posizione e morfologia del deposito di ghiaia grossa nella configurazione incanalata con deviatore.	76
7.28	DTM in alcuni istanti di tempo, ottenuti dall'elaborazione fotogrammetrica, per la prova incanalata con deviatore, con ammasso granulare zeolitico.	77
7.29	Effetto dell'interazione tra il flusso che scende parallelamente al canale e il flusso deviato.	78
7.30	Posizione e morfologia del deposito zeolitico, si nota il profilo incurvato lungo il deviatore.	78
7.31	Nell'immagine, a sinistra, il deposito ripreso da monte, la freccia indica il punto di vista da dove è stata scattata la foto di destra. Il flusso granulare è in grado di aggirare il deviatore risalendo verso monte.	79
7.32	Evoluzione nel tempo del volume occupato dall'ammasso costituito da ghiaia grossa, calcolato negli istanti elaborati fotogrammetricamente, nella prova incanalata con deviatore. L'errore medio stimato su base fotogrammetrica è pari a 0.18 dm^3	79

7.33	Evoluzione nel tempo del volume occupato dall'ammasso costituito da materiale zeolitico, calcolato negli istanti elaborati fotogrammetricamente, nella prova incanalata con deviatore. L'errore medio stimato su base fotogrammetrica è pari a 0.19 dm^3	80
7.34	A sinistra, un deposito di materiale granulare a monte di una ostruzione naturale nel canale del rio Acquabona. A destra, la modalità con cui il materiale granulare è stato inizialmente disposto nella canaletta sperimentale prima della restituzione in canaletta. Il cedimento del supporto di valle costituisce l'innescò per la movimentazione dell'ammasso.	81
7.35	A sinistra, valanga di neve granulare ripresa nel versante meridionale del gruppo del Sorapiss. A destra l'ammasso zeolitico che collide con il deviatore. La natura granulare dei fenomeni permette di accomunarli da un punto di vista reologico.	81
8.1	Raster di un tronco-cono appoggiato su un piano inclinato a forte pendenza a sua volta connesso ad un piano inclinato di pendenza minore.	90
8.2	Sezioni trasversali della forma assunta da un ammasso granulare zeolitico contenuto inizialmente in un contenitore tronco-conico di altezza 20 cm, diametro di base pari a 57.7 cm e angolo di inclinazione della superficie laterale pari a 40 gradi. L'angolo di attrito tra il materiale e il fondo è pari a 22 gradi.	92
8.3	Andamento della profondità all'arresto dell'ammasso, adimensionalizzata con la altezza massima iniziale, rispetto alla distanza dal centro della forma tronco-conica, anch'essa adimensionalizzata con la altezza massima iniziale, per il test di Figura 8.2.	93
8.4	Viste del test di Figura 8.3 in alcuni istanti iniziali del moto, durante i quali si verifica la maggior parte della deformazione dell'ammasso.	93
8.5	Andamento della profondità all'arresto dell'ammasso, adimensionalizzata con la altezza massima iniziale, rispetto alla distanza dal centro della forma tronco-conica, anch'essa adimensionalizzata con la altezza massima iniziale, per il test eseguito con un tronco-cono con superficie inclinata di 50 gradi. Sono mostrati i profili numerici ottenuti con due diversi coefficienti d'influenza (C_{inf}).	94
8.6	Posizioni delle sezioni trasversali (A, B, C, D, E) e della sezione longitudinale (L) utilizzate per la rappresentazione dei risultati sperimentali e numerici.	94
8.7	Viste della evoluzione morfologica dell'ammasso granulare costituito da ghiaia grossa dalla forma tronco-conica iniziale fino all'arresto. A sinistra i dtm ottenuti fotogrammetricamente in laboratorio; a destra i dtm ottenuti dalla analisi numerica.	96
8.8	Test su pendio aperto con ghiaia grossa. Confronto tra l'andamento della superficie libera sperimentale e numerica agli istanti di tempo $t = 0.4 \text{ s}$, 0.8 s , 1.53 s , 3.67 s , lungo la sezione longitudinale L di Figura 8.6.	98
8.9	Test su pendio aperto con ghiaia grossa. Confronto tra l'andamento della superficie libera sperimentale e numerica, lungo le sezione trasversali indicate in figura (Figura 8.6), agli istanti di tempo $t = 0.4 \text{ s}$, sezioni A e B, $t = 0.8 \text{ s}$, sezioni A e B, e $t = 1.53 \text{ s}$, sezioni A, B, C e D.	99
8.10	Test su pendio aperto con ghiaia grossa. Confronto tra l'andamento della superficie libera sperimentale e numerica lungo la sezione trasversale D (Figura 8.6), all'istante di tempo $t = 3.67 \text{ s}$	100

8.11	Viste della evoluzione morfologica dell'ammasso granulare costituito da zeoliti dalla forma tronco-conica iniziale fino all'arresto. A sinistra i dtm ottenuti fotogrammetricamente in laboratorio; a destra i dtm ottenuti dalla analisi numerica.	101
8.12	Test su pendio aperto con materiale zeolitico. Confronto tra l'andamento della superficie libera sperimentale e numerica agli istanti di tempo $t = 0.4$ s, 1.0 s, 1.53 s, 2.67 s, lungo la sezione longitudinale L di Figura 8.6.	102
8.13	Test su pendio aperto con materiale zeolitico. Confronto tra l'andamento della superficie libera sperimentale e numerica lungo le sezione trasversali indicate in figura (Figura 8.6), agli istanti di tempo $t = 0.4$ s, sezioni A e B, $t = 1.0$ s, sezioni A, B, C e D, e $t = 1.53$ s, sezioni C e D.	103
8.14	Test su pendio aperto con materiale zeolitico. Confronto tra l'andamento della superficie libera sperimentale e numerica lungo la sezione trasversale E (Figura 8.6), all'istante di tempo $t = 2.67$ s.	104

Elenco delle tabelle

2.1	Relazioni tra i 2 sistemi di riferimento angolare per 4 diverse fotografie. . . .	17
4.1	Parametri di calibrazione delle videocamere Basler Ace GigE: ncam identifica la videocamera, c è la distanza focale nominale; c_{cal} è il valore ottenuto dopo la calibrazione svolta; x_p e y_p sono le coordinate del punto principale sull'immagine; k_1 , k_2 , k_3 sono i parametri di distorsione radiale; p_1 e p_2 sono i parametri di distorsione tangenziale.	39
4.2	Distanze focali delle videocamere Basler Ace GigE con dimensione pixel non corretta e pari a 0.005 mm. ncam è il numero che identifica le videocamere, c è il valore nominale della distanza focale, c_{cal} è il valore ottenuto dopo la calibrazione svolta. S.E è l'errore standard.	39
4.3	Parametri di calibrazione per la videocamera Canon Powershot Pro1: distanza focale nominale c ; distanza focale calibrata c_{cal} ; coordinate del punto principale sull'immagine x_p e y_p ; parametri di distorsione radiale k_1 , k_2 , k_3 ; parametri di distorsione tangenziale p_1 e p_2	39
6.1	La densità dei materiali utilizzati nelle prove sperimentali, la loro porosità, e il compattamento subito.	52

Capitolo 1

Introduzione

La naturale evoluzione di un bacino montano può creare situazioni in cui si sviluppano eventi improvvisi che possono coinvolgere grandi quantità di materiale.

I materiali coinvolti sono diversi (ammassi di roccia, ammassi di ghiaccio, ammassi di neve) possono essere messi in movimento per cause diverse, subendo una fase iniziale di accelerazione lungo il versante, quando le forze motrici prevalgono sulle forze d'attrito, e di rallentamento, al diminuire della pendenza, fino all'arresto, spesso nella zona di fondo valle, al prevalere delle forze d'attrito.

Questi fenomeni presentano l'aspetto di ammassi granulari in movimento, trifasici nel caso delle colate di detrito (in presenza di materiale solido, di acqua ed aria interstiziale) bifasici nel caso delle valanghe di roccia e di neve primaverile (a conseguenza del processo di granulazione al momento dell'innesco).

Nel corso dell'estate 2015 si sono registrate diverse colate in area dolomitica, si registrano in particolare tre episodi significativi che hanno provocato disagi nella circolazione stradale della statale Alemagna 51, gli episodi si sono verificati a Acquabona nel comune di Cortina d'Ampezzo (BL).

L'inverno del 2013-2014 ha registrato invece, nella zona dell'alto bellunese, eccezionali precipitazioni nevose che hanno provocato lo sviluppo, nella primavera successiva, di valanghe di neve di grandi dimensioni che hanno interessato settori non solitamente coinvolti.

L'osservazione di questi fenomeni (finalizzata all'individuazione delle aree sorgenti, all'interpretazione dei meccanismi di innesco, alla caratterizzazione della reologia, alla determinazione delle aree che potrebbero essere soggette a tali fenomeni) risulta assai difficoltosa e spesso pericolosa, a causa della sua imprevedibilità temporale, della sua breve durata e della sua elevata intensità.

Tuttavia la crescente occupazione di territorio ad uso antropico richiede un continuo aggiornamento e una continua ridefinizione delle aree a rischio, questa esigenza impone di aumentare le conoscenze su questo tipo di fenomeni.

Un ausilio importante nel processo di conoscenza viene dalla simulazione mediante modellazione fisica, regolata dalla applicazione della analisi dimensionale e dalla teoria della similitudine.

Questo tipo di modelli sono in grado di simulare i meccanismi di innesco, propagazione e di arresto. I loro limiti sono legati ai costi e alla necessità di riprodurre soltanto alcune delle innumerevoli configurazioni nelle quali i fenomeni possono presentarsi.

Negli ultimi anni stanno emergendo i modelli numerici favoriti dalle grandi potenzialità di calcolo dei nuovi processori. La duttilità applicativa di questo tipo di modelli nel pot-

er modificare le condizioni al contorno (la topografia), le condizioni iniziali e le proprietà reologiche del materiale ha causato il loro diffuso utilizzo.

Nella letteratura scientifica i modelli sviluppati si possono dividere in due filoni. I modelli appartenenti al primo presentano un'approccio fisico che immagina il mezzo come un continuo, anche nel caso in cui questo si presenta in forma di ammasso granulare. Questa idea è basata sulla ipotesi che le dimensioni caratteristiche dei grani siano abbastanza piccole rispetto alle dimensioni del fenomeno e sia possibile descrivere la dinamica in forma integrale.

I modelli appartenenti al secondo filone invece descrivono l'ammasso in movimento mantenendo le sue proprietà di granularità.

Questo lavoro di tesi si inserisce in questo ultimo filone. I fenomeni fisici di riferimento sono le rock avalanches e le valanghe (snow avalanches) di neve densa.

La neve densa manifesta nella fase iniziale del moto un processo di granulazione, questa caratteristica determina un comportamento reologico che appare ben determinato dal modello utilizzato.

Capitolo 2

Fotogrammetria

2.1 Introduzione

La fotogrammetria è l'insieme delle procedure che permettono di ottenere le proprietà metriche di un oggetto a partire da un numero appropriato di immagini fotografiche dello stesso.

La fotografia, da un punto di vista ottico-proiettivo, è assimilabile ad una proiezione centrale: tutti i raggi provenienti dal mondo esterno vengono convogliati attraverso le lenti dell'obiettivo in un punto, o su un'area approssimabile ad un punto, e proiettati su uno schermo che li intercetta, costituito dalla pellicola fotografica di una camera analogica o dalla CCD di una camera digitale. Si può affermare che la fotografia è, con buona approssimazione, una vista prospettica della realtà.

La fotogrammetria, per poter essere correttamente applicata, ha dovuto pertanto attendere che si sviluppassero le conoscenze necessarie nell'ambito della geometria descrittiva e nell'ambito della fotografia, legando infine le due discipline. Nota la prospettiva, ed i procedimenti geometrici inversi per ricavare da essa le proiezioni ortogonali dell'oggetto reale, è stato possibile ricavare informazioni metriche dalle rappresentazioni fotografiche, prima in modalità geometrica proiettiva, poi in modalità analitica ed infine digitale.

In quanto segue, dopo un'introduzione alla fotogrammetria, vengono descritti i processi fondamentali che ogni software fotogrammetrico deve essere in grado di svolgere, accennando infine alle diverse modalità d'approccio nella conduzione delle procedure fotogrammetriche, con i relativi punti di forza ed i limiti.

2.2 La fotogrammetria digitale

La tecnica fotografica tradizionale prevedeva la cattura della luce, nei suoi vari colori, da parte di un'emulsione chimica stesa su una pellicola. L'evoluzione tecnologica ha messo a disposizione degli operatori fotocamere e videocamere digitali che utilizzano un particolare dispositivo elettronico, denominato sensore d'immagine, costituito, nella maggioranza dei casi, da un sensore CCD (Figura 2.1).

Il sensore CCD è composto da un elevatissimo numero di minuscoli elementi sensibili alla luce.

Durante l'effettuazione di una ripresa, la luce che colpisce ogni micro-componente del sensore viene trasformata in differenza di potenziale mediante un convertitore analogico/digitale (A/D). Ad una maggiore intensità luminosa corrisponde una più alta differenza di potenziale emessa dal componente.

Il segnale emesso da ogni singolo componente del sensore CCD viene trasferito in un circuito che si occupa della sua misurazione, della conversione in un numero e della sua memorizzazione.

Il numero dei livelli in cui la intensità luminosa viene suddivisa dipende dalla capacità risolutiva del convertitore A/D. Un convertitore a 8 bit esegue una trasformazione in 256 livelli, uno a 10 bit in 1024 livelli, uno a 12 bit 4096 livelli.

Dal momento che i componenti elementari della CCD non sono in grado di distinguere i differenti colori della luce, questi vengono rilevati mediante l'utilizzo di filtri anteposti al sensore. Nel sistema colore RGB, i filtri sono rosso (Red), verde (Green) e blu (Blue).

La tecnica attuale mette a disposizione videocamere con sensori CCD composti da più di 16 M pixel.

Ogni immagine digitale è così composta da un elevato numero di piccolissimi elementi quadrati (o più raramente rettangolari), la cui composizione costituisce la fotografia vera e propria.

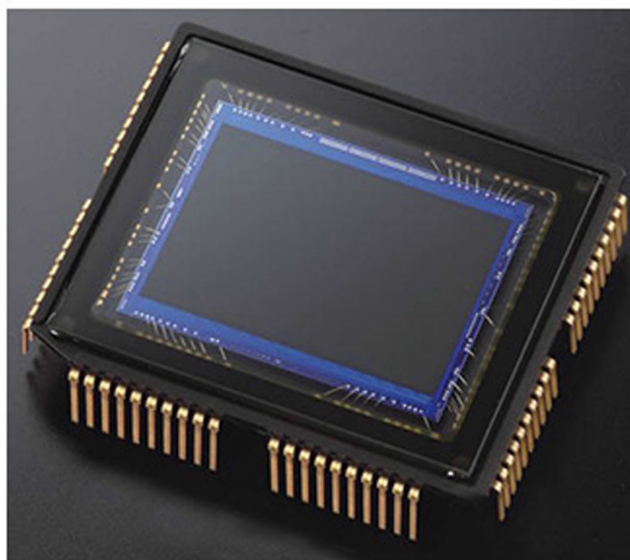


Figura 2.1: Esempio di CCD a 10,2 Megapixel.

2.3 Fondamenti di ottica geometrica

L'ottica geometrica studia il comportamento della luce quando questa incontra una superficie di separazione tra due materiali con densità differente.

Ogni qualvolta ciò accade i raggi di luce subiscono due fenomeni: una parte viene riflessa, ovvero deviata di un angolo simmetrico all'angolo di incisione calcolato sulla normale alla superficie, un'altra penetra nel secondo materiale e subisce una deviazione che è funzione della densità ottica del secondo materiale.

Per lente (Figura 2.2) si intende generalmente un solido di materiale trasparente a quella parte di spettro elettromagnetico chiamato luce, e delimitato da calotte di forma sferica in grado di deviare il cammino dei raggi luminosi che lo raggiungono.

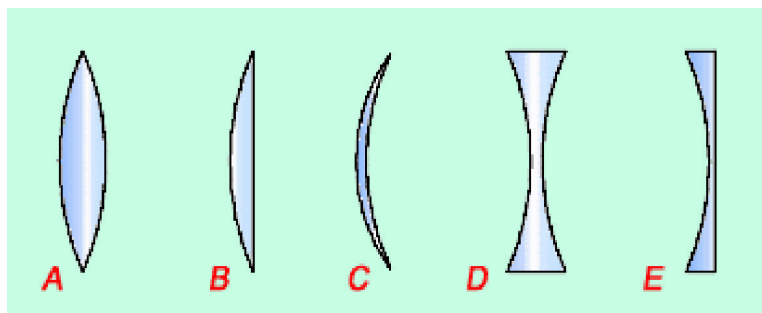


Figura 2.2: Caratteristiche geometriche delle lenti: A equi-convessa; B piano-convessa; C a menisco positivo; D equi-concava; E piano concava.

La forma circolare della lente è una conseguenza della lavorazione sferica, l'unica che garantisca un angolo di rifrazione costante e contemporaneamente la focalizzazione, ovvero la convergenza, dei raggi luminosi su un solo piano.

Le lenti standard possono essere positive come A, B e C e negative come D ed E. Le lenti positive sono più spesse al centro che ai bordi, le negative viceversa. Le lenti positive sono dette anche convergenti, mentre le negative sono dette divergenti in funzione dell'effetto che subisce il fascio luminoso dopo averle attraversate. La lente A si dice equiconvessa, la B si dice piano-convessa, la C a menisco positivo. La lente D si dice equiconcava, la E si dice piano concava.

Quando la luce attraversa una lente attraversa due superfici che dividono tre mezzi con indice di rifrazione diverso, per esempio l'aria, poi il vetro (prima faccia della lente), poi di nuovo l'aria separata dalla seconda faccia della lente. Ogni volta che una superficie viene attraversata cambia l'indice di rifrazione e il raggio di luce viene rifratto.

L'indice di rifrazione si definisce come il rapporto tra il seno dell'angolo di incidenza e quello dell'angolo rifratto.

Una caratteristica delle lenti convergenti consiste nel far convergere tutti i raggi che arrivano paralleli in un punto detto fuoco. Il piano normale all'asse ottico sul quale si trova questo punto prende il nome di piano focale, mentre la distanza tra il centro della lente e il fuoco si definisce lunghezza focale o, più brevemente, focale.

La formula delle lenti lega la distanza dell'oggetto dalla lente con la distanza dell'immagine e la focale (eq. 2.1). Indicando con D la distanza dell'oggetto, con d quella dell'immagine e con f la distanza focale si ha:

$$\frac{1}{D} + \frac{1}{d} = \frac{1}{f} \quad (2.1)$$

La eq. 2.1 permette di conoscere a quale distanza dal fuoco e dalla lente si forma l'immagine.

Consideriamo sei diversi casi di formazione delle immagini (Figura 2.3):

Caso1: L'oggetto è a distanza infinita. L'uso di una piccola lente d'ingrandimento di vetro per far convergere nel fuoco i raggi solari è un esempio pratico approssimato di questo caso. Benché il Sole non sia a distanza infinita, esso è così lontano che i suoi raggi giungono sulla Terra pressoché paralleli. Se un oggetto è a distanza infinita, così che i suoi raggi sono paralleli, l'immagine è un punto situato nel fuoco reale. Questo caso

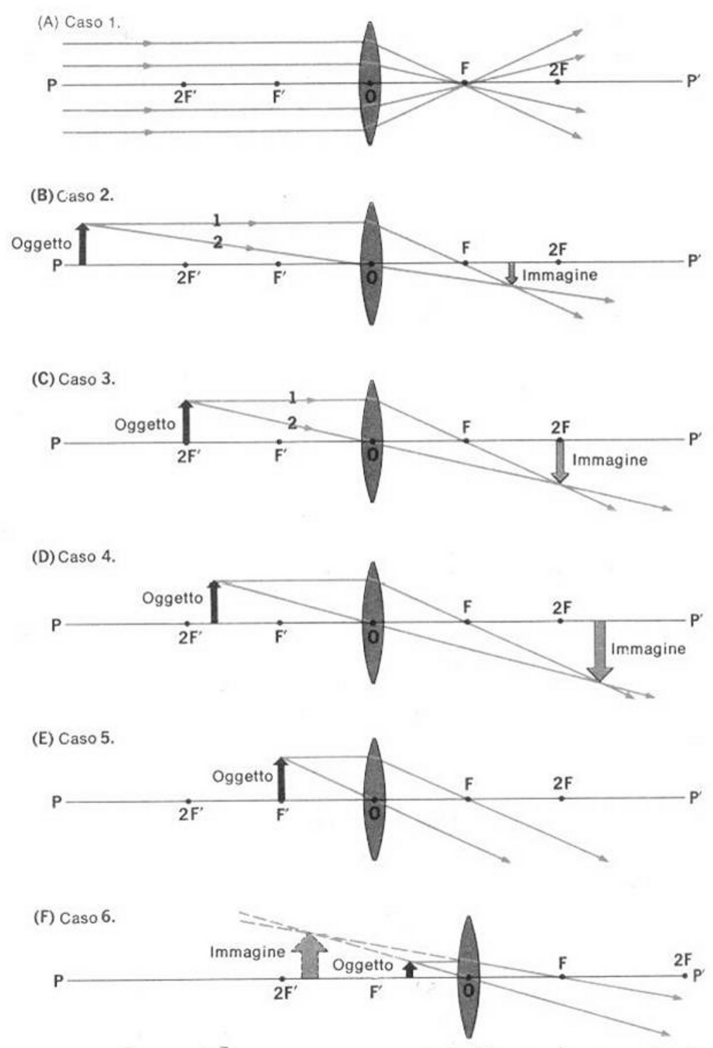


Figura 2.3: Formazione delle immagini nelle lenti positive.

può essere applicato per trovare la distanza focale di una lente facendo convergere i raggi solari su uno schermo bianco. La distanza tra lo schermo e il centro ottico della lente rappresenta la distanza focale;

Caso 2: L'oggetto si trova a distanza finita, ma al di là del doppio della distanza focale. Per trovare l'immagine si usano i raggi coincidenti con gli assi secondari e quelli paralleli all'asse principale. L'immagine è reale, capovolta, impiccolita e situata tra F e 2F, dalla parte opposta della lente. Le lenti dell'occhio umano, le lenti della macchina fotografica e l'obiettivo del cannocchiale astronomico sono applicazioni di questo caso;

Caso 3: L'oggetto si trova ad una distanza doppia della distanza focale. L'immagine è reale, capovolta, di dimensioni uguali a quelle dell'oggetto, e situata in 2F, dalla parte opposta della lente. La lente invertente del cannocchiale terrestre, che inverte l'immagine senza cambiarne le dimensioni, è un'applicazione di questo caso;

Caso 4: L'oggetto si trova tra la doppia distanza focale e il fuoco. È l'inverso del caso 2. L'immagine è reale, capovolta, ingrandita e situata al di là di 2F, dalla parte opposta della lente. Il microscopio composto, l'apparecchio da proiezione, i proiettori cinematografici sono applicazioni di questo caso;

Caso 5: L'oggetto si trova nel fuoco principale. È l'inverso del caso 1. Non si forma nessuna immagine, poiché i raggi luminosi rifratti escono dalla lente paralleli tra loro. Le lenti usate nei fari e nei riflettori sono applicazioni di questo caso;

Caso 6: L'oggetto si trova tra il fuoco principale e la lente. I raggi rifratti escono divergenti dalla lente e quindi non possono dare origine, dalla parte opposta della lente, ad un'immagine reale. Convergono invece i loro prolungamenti dalla parte della lente dove si trova l'oggetto, formando così un'immagine virtuale, diritta, ingrandita. È il caso del microscopio semplice, degli oculari dei microscopi composti e dei cannocchiali.

Se un raggio luminoso attraversa una lastra di vetro a facce piane e parallele ed incontra la prima superficie con angolo di incidenza θ_i , viene rifratto, avvicinandosi alla normale, con angolo di rifrazione θ_r . Si può dimostrare, inoltre, che la direzione del raggio emergente è uguale a quella del raggio incidente poiché le due superfici sono parallele (Figura 2.4).

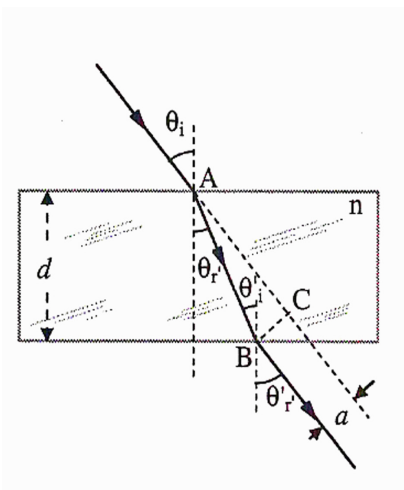


Figura 2.4: Rifrazione di un raggio luminoso che attraversa una lastra di vetro a facce parallele.

L'obiettivo fotogrammetrico è sempre costituito da un insieme di lenti, accostate o distanziate tra loro, tali da annullare le aberrazioni e le distorsioni delle immagini. Se consideriamo tutti i fasci di raggi uscenti da diversi punti del terreno, si vedrà che essi convergono tutti in un punto N_1 dell'asse ottico dell'obiettivo, che è il primo punto nodale, e fuoriescono parallelamente da un secondo punto N_2 dello stesso asse, detto secondo punto nodale. In corrispondenza di questo punto i fasci si dividono nuovamente e danno origine all'immagine sul piano dell'emulsione o della CCD. Nel caso di oggetto posto a distanza infinita, è necessario far coincidere il piano dell'emulsione col piano focale affinché le immagini siano raccolte. È lecito quindi considerare l'esistenza di due punti nodali che risultano dall'intersezione dell'obiettivo con i suoi piani principali. I punti nodali sono tali che ogni raggio incidente in N_1 riemerge parallelamente a se stesso da N_2 (Figura 2.5). Per distanza principale si intende quindi la distanza N_2P , del secondo punto nodale dal piano del fotogramma.

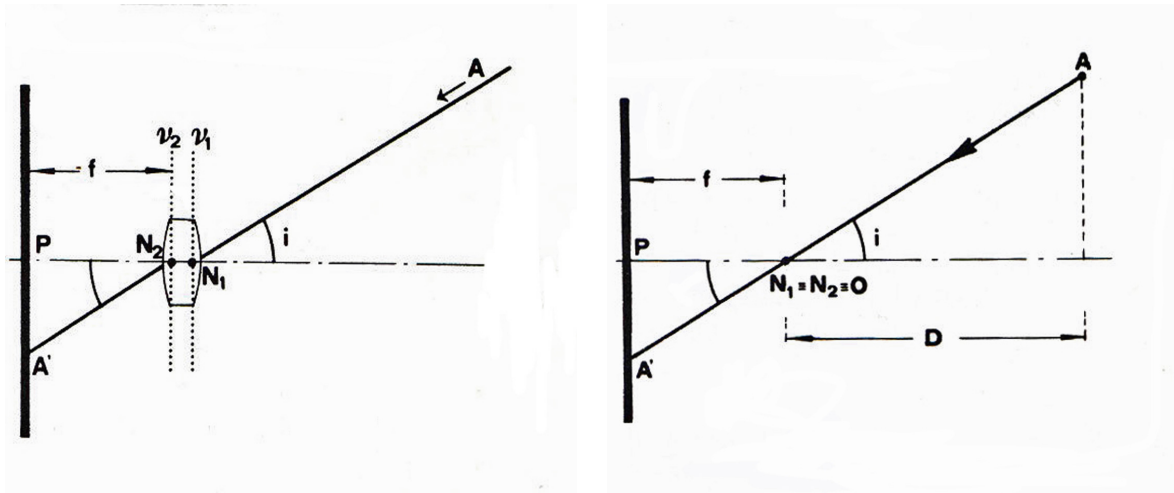


Figura 2.5: Schema di formazione dell'immagine per una lente rappresentata dai suoi nodali.

Tutti i raggi provenienti da un punto oggetto, che attraversano l'obiettivo, devono passare attraverso il diaframma. L'immagine apparente del diaframma, vista dalla parte dell'oggetto, limita perciò l'effettivo fascio di raggi che formano il punto immagine; quest'immagine apparente si chiama pupilla d'entrata. Il suo centro è il centro di prospettiva O nello spazio oggetto. L'analoga pupilla d'uscita giace nello spazio immagine dell'obiettivo.

Allo schema teorico di un obiettivo in cui si considerino i due piani principali (e contemporaneamente nodali) incontranti l'asse ottico in N_1 e N_2 corrisponde nella realtà una successione di mezzi ottici diversi (lenti di materiale vario ed aria), separati da superfici curve. Dopo l'incollaggio e l'assemblaggio di tutte le singole lenti e il montaggio dell'obiettivo sulla camera si saranno inevitabilmente accumulati piccoli errori. All'asse ottico teorico di Figura 2.5, fa riscontro nella realtà un asse principale passante per il centro della pupilla d'entrata O e normale al piano dell'immagine.

Il suo prolungamento fisico, cioè ottico, incontra però il piano dell'immagine in A e non in A_o , piede della perpendicolare predetta. A prende il nome di punto principale di autocollimazione. I centri O e O_1 delle pupille non coincidono coi punti nodali N_1 e N_2 , per cui gli angoli α e α' non sono fra loro uguali. A un raggio passante per O con angolo α sull'asse principale, dovrebbe corrispondere l'immagine P' sul piano coniugato. In realtà, per quanto l'obiettivo sia corretto, vi è una residua distorsione, a conseguenza della quale l'immagine si forma in P'_1 (Figura 2.6).

Se ora si manda da A la normale al piano dell'immagine e da P'_1 la parallela al raggio entrante, formante perciò con la normale stessa un angolo α , si avrà come loro punto d'incontro O'_1 , che è il centro matematico della prospettiva. La sua distanza c dalla immagine è la costante della camera, e sta a rappresentare quella che nello schema teorico di Figura 2.5 è la distanza principale. Δ rappresenta la distorsione residua.

Il telaio della camera fotogrammetrica porta sempre dei segni fiduciali in posizione fissa. Tali segni, o marche, hanno forma diversa a seconda dei costruttori. Il centro degli assi realizzabili congiungendo le marche a due per volta, generalmente non coincide per piccolissimi importi con il punto di autocollimazione A precedentemente introdotto. Le coordinate di quest'ultimo rispetto al sistema di assi del fotogramma si indicano con x_0 , y_0 , e vengono riportate nel certificato di calibrazione della camera. Nella Figura 2.7 le intersezioni delle

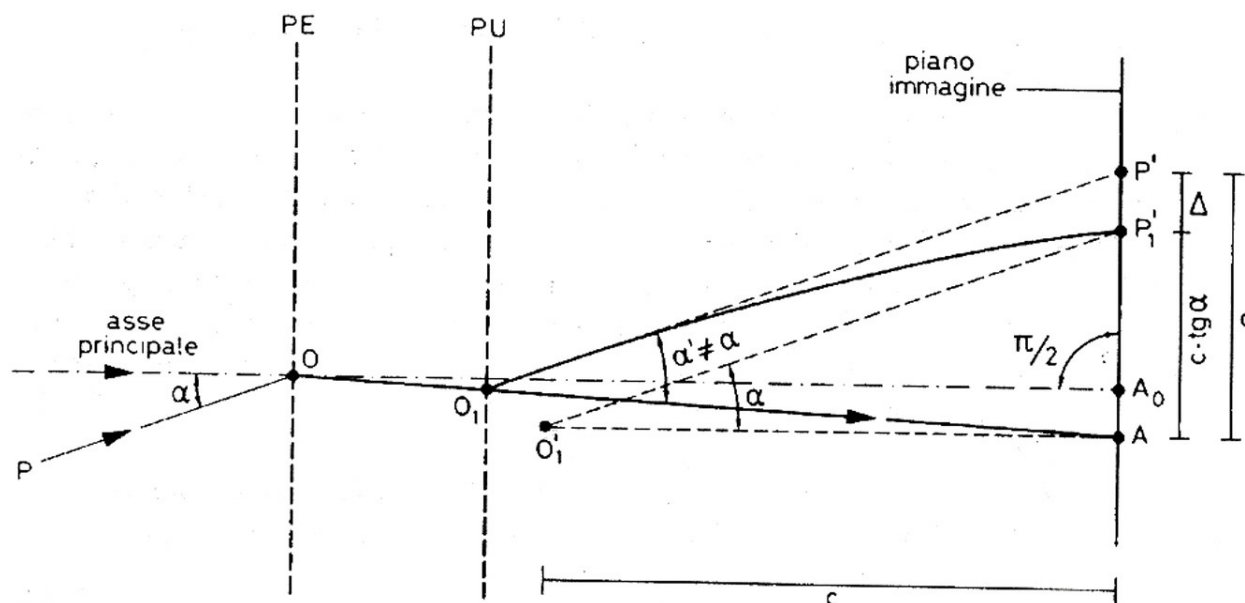


Figura 2.6: Punto principale di autocollimazione e distanza principale.

linee congiungenti marche fiduciali opposte determina il centro fiduciale FC, PP rappresenta il punto principale di autocollimazione, mentre P' un punto immagine generico.

Alle grandezze c , x_0 , y_0 , si dà il nome di parametri di orientamento interno della prospettiva. Va però aggiunta ad essi la funzione di distorsione secondo la relazione 2.2:

$$r_i = c \tan \alpha + \Delta \quad (2.2)$$

La distanza focale c varia a seconda della distanza a cui è posto l'oggetto e per questo la maggior parte delle fotocamere per uso fotogrammetrico operano a fuoco fisso adattate per l'infinito o comunque oltre la distanza iperfocale, distanza oltre la quale tutti gli oggetti si possono praticamente ritenere a fuoco [9].

L'imperfezione associata alla costruzione degli obiettivi genera l'effetto di distorsione più importante dal punto di vista della fotogrammetria, dato che influisce sulla geometria della immagine stessa e quindi sulle misure che su tali immagini devono essere eseguite. La distorsione produce uno spostamento dell'immagine, rispetto alla posizione che tale immagine avrebbe assunto se l'obiettivo fosse stato perfettamente corretto. Tale spostamento ha una componente radiale, Δr , ed una tangenziale, Δt (Figura 2.8). Nelle normali applicazioni fotogrammetriche, viene generalmente presa in considerazione la sola componente nella direzione radiale.

La distorsione radiale delle lenti causa lo spostamento dei punti dell'immagine dal punto principale lungo linee radiali. La distorsione tangenziale si determina come angolo destro

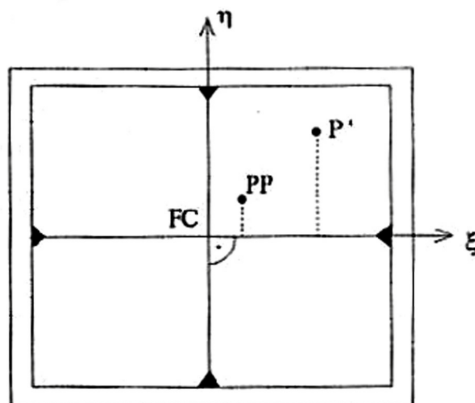


Figura 2.7: Deviazione del centro dell'asse ottico dalla congiungente delle marche fiduciali, sul piano dell'immagine.

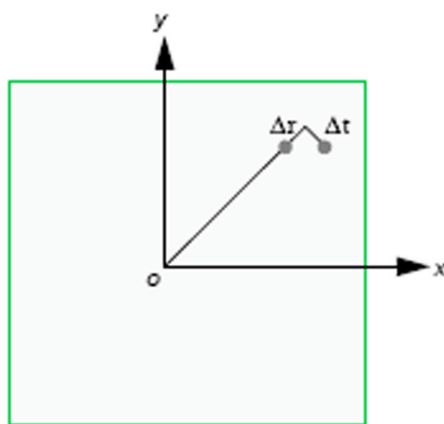


Figura 2.8: Distorsione radiale e tangenziale delle lenti.

rispetto alle linee radiali. L'effetto della distorsione radiale attraverso un'immagine può essere approssimato mediante l'utilizzo di un polinomio del tipo di eq. 2.3, utilizzato per il calcolo dei coefficienti associati alla distorsione radiale delle lenti.

$$\Delta r = k_0 r + k_1 r^3 + k_2 r^5 \quad (2.3)$$

Le macchine fotografiche metriche, usate tradizionalmente in fotogrammetria, posseggono un certificato di calibrazione in cui sono dati i valori del punto principale, della distanza focale e la curva di distorsione radiale. [10]

2.4 Orientamento esterno

L'orientamento esterno definisce la posizione e le coordinate angolari della macchina fotografica che cattura un'immagine. L'elemento posizionale è definito dalle coordinate X_0 , Y_0 , Z_0 del centro di prospettiva O , rispetto allo spazio oggetto, con sistema di riferimento X , Y , Z . Gli elementi rotazionali descrivono il rapporto tra il sistema di coordinate nello spazio

oggetto X, Y, Z rispetto allo spazio immagine x, y, z . A questo proposito si definiscono, generalmente, 3 angoli di rotazione ω, φ, κ (Figura 2.9).

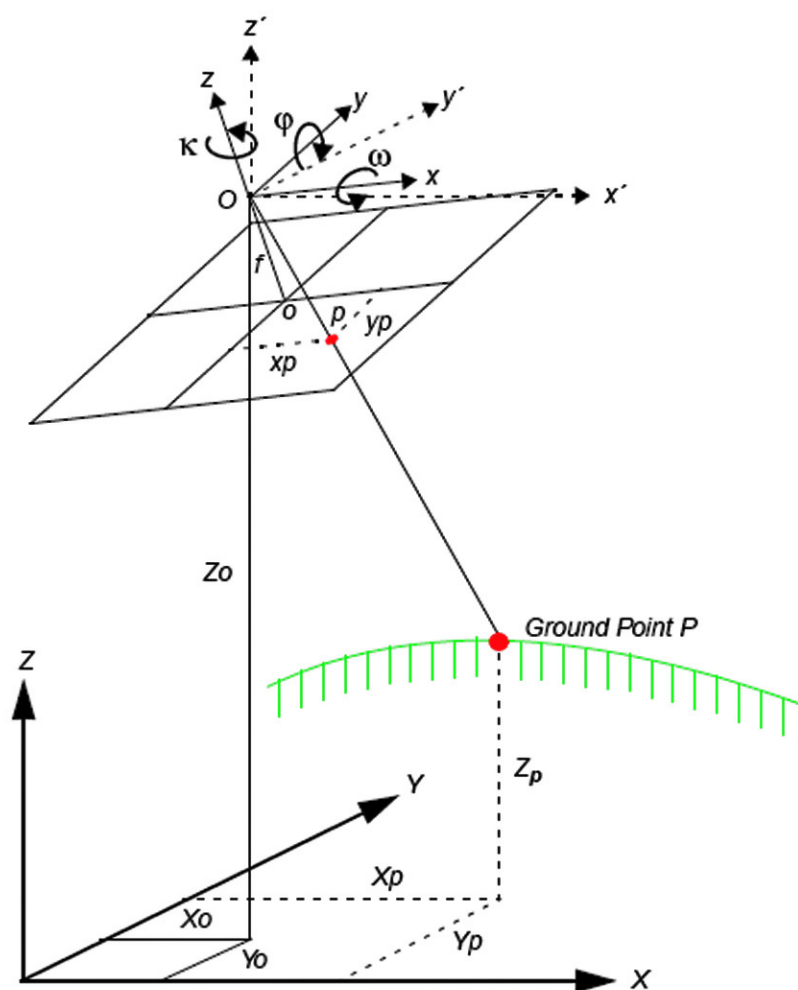


Figura 2.9: Definizione dei parametri di orientamento esterno.

L'orientamento esterno stabilisce quindi una relazione tra i 2 diversi sistemi di riferimento attraverso la descrizione della posizione della macchina fotografica nello spazio oggetto. I valori dei 6 parametri incogniti, sono necessari per descrivere il modello di collinearità.

2.4.1 Le equazioni di collinearità

Per rappresentare i raggi registrati dalla macchina fotografica si utilizza una soluzione analitica basata su un modello matematico. Questo modello assume che il raggio debba essere una linea retta che passa attraverso il punto immagine p , il centro di prospettiva O , e il ground point P . Le equazioni di collinearità sono così espresse (eq. 2.4, eq. 2.5):

$$x_p - x_0 = -f \left[\frac{m_{11}(X_p - X_0) + m_{12}(Y_p - Y_0) + m_{13}(Z_p - Z_0)}{m_{31}(X_p - X_0) + m_{32}(Y_p - Y_0) + m_{33}(Z_p - Z_0)} \right], \quad (2.4)$$

$$y_p - y_0 = -f \left[\frac{m_{21}(X_p - X_0) + m_{22}(Y_p - Y_0) + m_{23}(Z_p - Z_0)}{m_{31}(X_p - X_0) + m_{32}(Y_p - Y_0) + m_{33}(Z_p - Z_0)} \right], \quad (2.5)$$

dove x_p e y_p rappresentano le coordinate del punto sull'immagine, x_0 e y_0 le coordinate del punto principale, m_{ij} i 9 coseni direttori dell'orientazione angolare, X_p, Y_p, Z_p , le coordinate del punto oggetto corrispondente, mentre X_0, Y_0, Z_0 , rappresentano le coordinate oggetto del centro di prospettiva.

Le equazioni di collinearità includono tutti i parametri di orientamento interno ed esterno richiesti per risolvere i problemi di allineamento. Le soluzioni analitiche consistono in sistemi di equazioni di collinearità che relazionano coordinate misurabili a parametri conosciuti e sconosciuti della fotogrammetria. Le equazioni sono risolte simultaneamente per determinare i parametri sconosciuti. Dato che, normalmente, sono disponibili misure in abbondanza che producono più equazioni rispetto alle incognite del problema, si usa un metodo ai minimi quadrati per stimare i parametri sconosciuti, inclusi gli errori nella stima delle coordinate (v_x, v_y) [7].

2.4.2 Orientamento esterno di un singolo fotogramma (space resection)

La space resection è la tecnica comunemente usata per determinare i parametri di orientamento esterno associati ad una o più immagini, basata su GCP (Ground Control Point) conosciuti. Devono essere conosciuti un minimo di 3 punti d'appoggio non allineati e aver misurato le corrispondenti coordinate lastra. Si avrà cioè:

$$\begin{array}{ll} P_1 = (X_1, Y_1, Z_1) & P'_1 = (x_1, y_1) \\ P_2 = (X_2, Y_2, Z_2) & P'_2 = (x_2, y_2) \\ P_3 = (X_3, Y_3, Z_3) & P'_3 = (x_3, y_3) \end{array}$$

Noti anche gli elementi dell'orientamento interno, le incognite saranno quindi in base alla (2.4) e (2.5):

$$X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa$$

Le equazioni di collinearità sono 2 per ogni punto noto, quindi in totale 6. Queste permettono di risolvere le 6 incognite in questione. il sistema di equazioni non è lineare, si deve trovare un metodo di calcolo che permetta la soluzione di questo sistema non lineare. Si passa attraverso soluzioni di un sistema semplificato lineare per avvicinarsi alla soluzione vera e si cerca poi la soluzione del sistema vero con tecniche numeriche applicate al caso particolare.

Procedendo in modo analogo col secondo fotogramma, si hanno infine i dati di una coppia, che permettono di ottenere le coordinate oggetto di punti, anche senza la misura delle coordinate di lastra.

È possibile usare, insieme ai punti d'appoggio, anche punti incogniti (tie points). Infatti, per ogni nuovo punto si hanno 3 nuove incognite e 4 nuove equazioni del tipo delle (2.4) e (2.5). Si ottengono così sistemi con numero di equazioni sovrabbondante, che, risolti col metodo dei minimi quadrati dopo opportuna linearizzazione, forniscono le incognite relative alla posizione dei punti di presa, alle rotazioni e alle altre incognite costituite dalle coordinate dei punti dell'oggetto di cui si siano misurate le coordinate di lastra.

Questo sistema non tiene conto della complanarità dei raggi omologhi, cioè dei segmenti di retta congiungenti il punto oggetto con le 2 immagini dello stesso punto sui 2 fotogrammi.

2.4.3 Orientamento combinato di una coppia di immagini

La procedura d'orientazione lavora in 2 passi: nel primo step (orientamento relativo), viene creato un modello stereoscopico delle 2 fotografie, in un arbitrario sistema di coordinate tridimensionale (x^*, y^*, z^*) . Nel secondo step (orientamento assoluto), questo modello viene trasformato nel sistema di coordinate (X, Y, Z) . Analizziamo per prima quest'ultima parte.

Orientamento assoluto

Il rapporto tra le coordinate del modello (x^*, y^*, z^*) , e le coordinate oggetto (X, Y, Z) può essere espresso dall'equazione:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0^* \\ Y_0^* \\ Z_0^* \end{pmatrix} + m [M] \begin{pmatrix} x^* \\ y^* \\ z^* \end{pmatrix}, \quad (2.6)$$

dove:

(X_0^*, Y_0^*, Z_0^*) sono le coordinate oggetto dell'origine del sistema (x^*, y^*, z^*) ;

m è il numero di scala del sistema (x^*, y^*, z^*) ;

$[M]$ è la matrice di rotazione fra i 2 sistemi di assi.

I 7 parametri $X_0^*, Y_0^*, Z_0^*, \omega, \varphi, \kappa, m$, sono detti elementi di orientamento assoluto. Per ricavare questi parametri abbiamo bisogno quindi di almeno 7 equazioni che si possono ottenere dall'equazione (2.6) nel modo seguente:

- 3 equazioni da 1 GCP in cui le coordinate (X, Y, Z) sono conosciute;
- 2 equazioni da 1 GCP in cui siano note le coordinate piane (X, Y) ;
- 1 equazione da 1GCP di cui sia nota soltanto l'altezza (Z) .

Si possono anche misurare 2 GCP con le sole coordinate piane e 3 GCP con la sola altezza per esempio, o 2 GCP con coordinate piane note e 1 GCP con l'altezza, purché quest'ultimo non sia collineare con i 2 precedenti.

Orientamento relativo

Se le posizioni e le orientazioni delle immagini sono restituite correttamente l'una rispetto all'altra tutte le coppie di raggi omologhi si intersecano nei punti che definiscono la superficie del modello nel sistema (x^*, y^*, z^*) .

Dato che 7 dei 12 parametri incogniti dell'orientamento esterno possono essere ricavati dall'orientamento assoluto, i 5 rimanenti si ottengono nello step successivo. Perciò è ragionevole assumere che una condizione necessaria per l'orientamento relativo, è che i raggi omologhi si intersechino da almeno 5 punti ben distribuiti della superficie, e se questo è vero allora tutte le altre coppie di raggi omologhi si intersecheranno. Prende il nome di orientamento relativo proprio perché vengono determinate soltanto le posizioni e le orientazioni relative di 2 fasci di raggi.

La condizione per un corretto orientamento relativo, ovvero l'intersezione di ognuna delle 5 coppie di raggi omologhi, deve essere formulata usando il triplo prodotto scalare dei 3 vettori b, p_1, p_2 (Figura 2.10). Il triplo prodotto scalare, è composto dal prodotto scalare di uno dei tre vettori con il prodotto vettoriale degli altri 2. Il prodotto vettoriale di due vettori complanari è un vettore perpendicolare al piano determinato dai primi due, se i 3

vettori sono complanari, il loro triplo prodotto scalare è 0, poichè il prodotto vettoriale di 2 di questi, è perpendicolare al terzo.

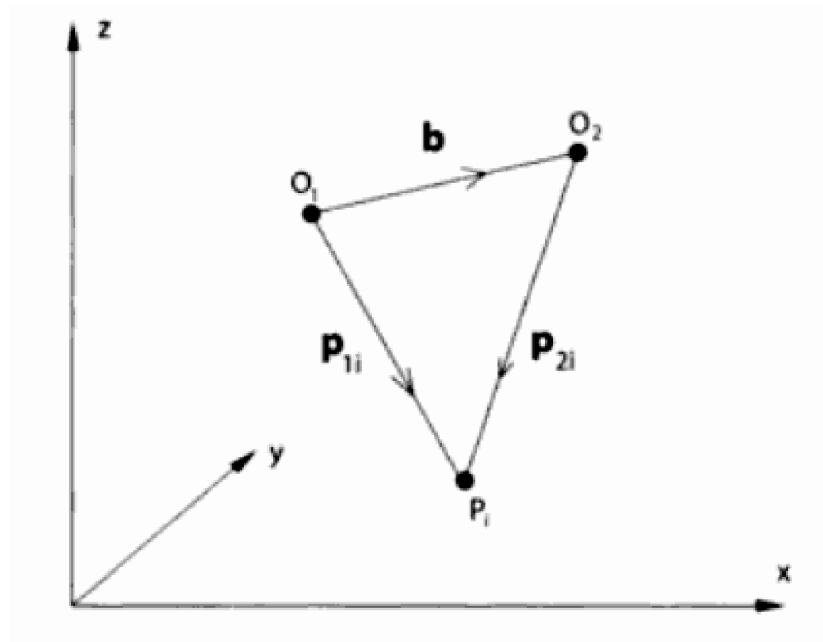


Figura 2.10: Condizione di complanarità.

La condizione di complanarità viene così espressa:

$$b \cdot (p_1 \times p_2) = 0$$

Utilizzando le equazioni di collinearità, invocando la condizione di complanarità dei raggi omologhi e misurando almeno 5 punti omologhi si ricavano i 5 parametri incogniti di orientamento relativo.

2.4.4 La matrice di rotazione

L'orientamento esterno definisce la relazione tra lo spazio immagine e lo spazio oggetto. La matrice di rotazione $[M]$ descrive proprio la relazione angolare tra i 2 sistemi di riferimento attraverso la definizione degli angoli denominati convenzionalmente ω , φ , κ .

Per le operazioni manuali che generalmente vengono svolte con la macchina fotografica, specialmente quando si parla di fotogrammetria terrestre, risulta più facile capire e predire il comportamento se si utilizzano gli angoli azimuth, elevation, roll, che in bibliografia si possono trovare anche con denominazioni diverse senza che però il significato geometrico cambi sostanzialmente (Figura 2.11).

I 9 termini della matrice risultano gli stessi per entrambe le terne di angoli. Disponendo quindi di questi valori, ricavati dalla conoscenza di una terna, si può facilmente ricavare l'altra terna di valori. In termini pratici, si può facilmente risalire ad ω , φ , κ , una volta misurati, sul campo, azimuth, elevation e roll.

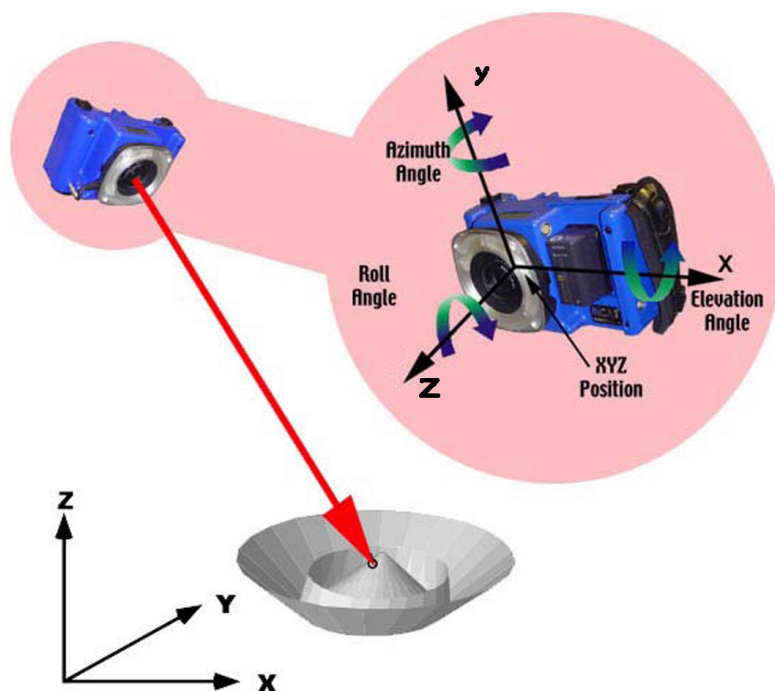


Figura 2.11: Definizione delle 3 rotazioni attorno agli assi di riferimento (www.geodetic.com).

Con riferimento alla Figura 2.12:

elevation: angolo fra l'orizzontale e l'asse della camera.

azimuth: angolo misurato in senso antiorario dall'asse Y riferito allo spazio oggetto all'intersezione dell'asse ottico della macchina con la superficie. In altre parole è l'azimuth della traccia del piano principale nel piano XY dello spazio oggetto.

roll: angolo misurato dall'asse Y alla linea principale.

Nella Tabella 2.1 si noti come i termini della matrice di rotazione siano uguali e si possa quindi utilizzare una o l'altra terna di angoli indifferentemente con la condizione però di utilizzare l'apposita matrice di rotazione.

Dalla matrice di rotazione si possono estrarre gli angoli con le seguenti relazioni:

$$az = \arctan\left(\frac{-m_{13}}{m_{23}}\right) \quad el = \arcsin(-m_{33}) \quad roll = \arctan\left(\frac{m_{31}}{m_{32}}\right),$$

$$\omega = \arctan\left(\frac{-m_{23}}{m_{33}}\right) \quad \varphi = \arcsin(m_{13}) \quad \kappa = \arctan\left(\frac{-m_{12}}{m_{11}}\right).$$

omega	15.6231	0.286713	0.864767	-0.41228	Image rotation matrix 3035.tif	azimuth	-59.2423
phi	-24.3481	-0.94906	0.197687	-0.24536		elevation	-61.33
kappa	-71.6571	-0.13067	0.461626	0.877398		roll	-15.8052
azimuth	-59.242	0.286722	0.864764	-0.41228		omega	15.62325
elevation	-61.33	-0.94906	0.197697	-0.24536		phi	-24.348
roll	-15.805	-0.13067	0.461626	0.877397		kappa	-71.6565
omega	5.6884	0.214547	0.864234	-0.45505	Image rotation matrix 3036.tif	azimuth	-79.0232
phi	-27.0681	-0.97663	0.195976	-0.08826		elevation	-62.3849
kappa	-76.0581	0.0129	0.46335	0.886081		roll	1.594788
azimuth	-79.0232	0.214547	0.864234	-0.45505		omega	5.688391
elevation	-62.3849	-0.97663	0.195976	-0.08826		phi	-27.0681
roll	1.5948	0.0129	0.46335	0.886081		kappa	-76.0581
omega	-7.5009	0.115593	0.862713	-0.49231	Image rotation matrix 3037.tif	azimuth	77.00343
phi	-29.4922	-0.97413	0.195362	0.113627		elevation	-59.6522
kappa	-82.3685	0.194205	0.466433	0.862974		roll	22.60497
azimuth	-102.997	0.115593	0.862713	-0.49231		omega	-7.50086
elevation	-59.6522	-0.97413	0.195362	0.113626		phi	-29.4922
roll	22.6049	0.194204	0.466433	0.862974		kappa	-82.3685
omega	57.6551	0.686613	0.314702	-0.65538	Image rotation matrix 3039.tif	azimuth	-45.7651
phi	-40.9486	-0.72626	0.255659	-0.63811		elevation	-23.8344
kappa	-24.6239	-0.03326	0.914112	0.404095		roll	-2.08377
azimuth	-45.7651	0.686613	0.314702	-0.65538		omega	57.65504
elevation	-23.8345	-0.72626	0.255661	-0.63811		phi	-40.9486
roll	-2.0837	-0.03326	0.914112	0.404096		kappa	-24.6239

Tabella 2.1: Relazioni tra i 2 sistemi di riferimento angolare per 4 diverse fotografie.

camera fotografica. L'approccio ai minimi quadrati procede per iterazione finché non viene raggiunta una soluzione. La soluzione è completa quando gli errori associati con i dati di input sono minimizzati. In altre parole implica la correzione dei valori dei parametri incogniti basandosi sulla minimizzazione dei residui dei dati di input. I residui derivano dalla differenza tra i valori misurati e calcolati per ogni punto. I residui, che sono minimizzati, includono le coordinate immagine dei GCP e dei TP assieme alle coordinate oggetto dei GCP.

Questa equazione esplicita una versione semplificata della condizione ai minimi quadrati:

$$V = AX - L \quad (2.7)$$

in cui,

V = matrice contenente i residui delle coordinate immagine;

A = matrice contenente le derivate parziali rispetto ai parametri incogniti, ovvero orientamento esterno ed interno, X, Y, Z dei tie point, e le coordinate dei GCP;

X = matrice contenente le correzioni ai parametri incogniti;

L = matrice contenente le osservazioni di input (coordinate immagine e coordinate GCP).

I componenti della condizione ai minimi quadrati sono relazionati direttamente al modello funzionale basato sulle equazioni di collinearità. La matrice A è formata dalla dif-

ferenziazione del modello funzionale basato sulle equazioni di collinearità. La matrice L è formata dalla differenza tra i risultati iniziali ottenuti col modello funzionale, con i risultati stimati determinati dal processo iterativo. La matrice X contiene le correzioni ai parametri di orientamento esterno.

La matrice X è calcolata in questa maniera:

$$X = (A^t P A)^{-1} A^t P L \quad (2.8)$$

In questa equazione P è la matrice contenente i pesi delle osservazioni.

La matrice dei residui V viene calcolata al termine di ogni processo iterativo. Ogni volta che viene completata un'iterazione, le nuove stime dei parametri incogniti sono utilizzate per ricalcolare le osservazioni di input così come le coordinate immagine. Dalla differenza tra le misurazioni iniziali e le nuove stimate si ricavano i residui. I residui forniscono un'indicazione preliminare sulla precisione di una soluzione; indica quanto un'osservazione si accorda, è compatibile con il modello funzionale.

Una volta che il "least square adjustment" è completato i risultati della triangolazione includono:

- parametri finali di orientamento esterno e loro accuratezza;
- parametri finali di orientamento interno e loro accuratezza;
- coordinate X, Y, Z dei tie points e loro accuratezza;
- GCP corretti e loro accuratezza.

2.6 Calibrazione di camere digitali non metriche (self-calibration)

2.6.1 Fondamenti analitici

L'utilizzo sempre più spinto di camere digitali non metriche in fotogrammetria, come del resto la macchina Canon Power Shot 1 e le videocamere utilizzate nel presente lavoro, hanno reso la fase di calibrazione un pre-requisito necessario all'estrazione dalle immagini di informazioni metriche tridimensionali precise e affidabili. La conoscenza dei parametri dell'orientamento interno, cioè la distanza principale (c) e la posizione del punto principale (x_p, y_p), e dei parametri di distorsione delle lenti è una condizione indispensabile per l'esecuzione di un rigoroso progetto fotogrammetrico.

Questi parametri, nelle camere metriche e semimetriche, sono noti attraverso il certificato di calibrazione, mentre nel caso in cui vengano utilizzati dei dispositivi di presa non finalizzati alla fotogrammetria possono essere determinati attraverso procedure analitiche. Il modello di calibrazione può essere esteso considerando anche gli effetti dovuti ad ulteriori due parametri (p_1, p_2) che modellizzano la distorsione tangenziale. Quest'ultima è causata dal decentramento delle lenti rispetto all'asse ottico. La distorsione tangenziale produce, generalmente, effetti trascurabili rispetto alla distorsione radiale e pertanto influisce in grado minore sul risultato e sulla precisione finale.

La procedura si basa sulla soluzione di un calcolo di bundle-adjustment eseguito considerando come incognite i sei parametri di orientamento esterno delle immagini e i sei parametri di calibrazione della camera ($c, x_p, y_p, k_1, k_2, k_3$). Note le coordinate oggetto di un

certo numero di punti è possibile risolvere il calcolo di bundle-adjustment. La calibrazione si basa sulla determinazione dei parametri di orientamento e di distorsione contestualmente alla fase di rilievo fotogrammetrico utilizzando simultaneamente le prese fotografiche dell'oggetto e punti di coordinate note. La possibilità di determinare i parametri di calibrazione specifici per ogni rilievo risulta vantaggiosa soprattutto quando si utilizzano camere fotografiche non metriche che presentano una scarsa stabilità dei parametri di calibrazione. Di contro, alcune condizioni che si possono verificare durante le operazioni di rilevamento fotogrammetrico (particolari condizioni logistiche, inadeguatezza dello schema di presa, impossibilità di utilizzare punti presegnalizzati), possono rappresentare degli inconvenienti nel processo di calibrazione [8].

Nelle sperimentazioni descritte nel seguito è stato utilizzato il modello di collinearità esteso, in cui i termini di correzione delle coordinate immagine Δx e Δy sono funzione dei 10 parametri addizionali (APs) del modello fisico di Brown [Brown, 1971], che modellano l'orientamento interno della camera ($\Delta x_p, \Delta y_p, \Delta c$), l'incertezza sulla forma del pixel (shape factor S_x), un fattore che tenga conto della non ortogonalità del sistema di riferimento (shear factor A), i parametri della distorsione radiale simmetrica della lente (k_1, k_2, k_3) ed i parametri della distorsione tangenziale della lente (p_1, p_2), secondo le equazioni :

Risolvere un Bundle adjustment con Self – Calibration significa stimare i parametri addizionali nelle equazioni soprascritte e contemporaneamente i parametri di orientamento esterno di ogni immagine e le coordinate oggetto dei punti, per mezzo della collimazione di un certo numero di punti omologhi in tutte le immagini. Combinando tutte le equazioni scritte per tutti i punti in tutte le immagini, si compone un sistema certamente ridondante che può così essere risolto con il metodo dei minimi quadrati.

2.6.2 Ottimizzazione del self-calibration bundle adjustment

Per valutare i risultati della self-calibration bisogna riesaminare i valori di orientamento interno ed i corrispondenti valori di accuratezza. Se il valore di accuratezza del punto principale è maggiore del valore del punto principale stesso il livello di confidenza della stima può essere considerato basso. Allo stesso modo, se la lunghezza focale varia drasticamente dal valore iniziale di input, si deve ricontrollare il valore e riesaminare la calibrazione.

Dal momento che sia i parametri di orientamento interno che esterno vengono processati in un'unica soluzione, esiste una correlazione tra tutti i parametri. In altre parole, l'attendibilità della stima dell'orientamento interno è influenzata negativamente dalla stima dei parametri esterni. Per minimizzare la correlazione si devono effettuare delle fotografie oblique cosicché l'asse ottico della camera sia intenzionalmente inclinato lontano dalla verticale dell'orientamento esterno. Lo stesso effetto si ottiene con immagini altamente convergenti con 80% o più di sovrapposizione. Se possibile, inoltre, è fondamentale avere dei punti con Z variabili. Introducendo GCP variabili nella direzione Z si minimizza la correlazione tra i 2 sistemi di orientamento.

Vari studi sperimentali nel campo della fotogrammetria terrestre, tra i quali [Grün & Beyer, 2001; Remondino & Fraser, 2006], hanno dimostrato che:

- l'accuratezza migliora con il numero di immagini del progetto;
- l'accuratezza migliora con il numero di punti collimati in un'immagine; i punti devono essere ben distribuiti in tutta l'immagine.

2.6.3 I parametri addizionali (AP)

Il più comune set di parametri impiegato per compensare gli errori sistematici nella CCD delle camere, è il modello di Brown a 10 parametri (vedi par.2.6.1).

I 3 parametri addizionali utilizzati per modellare la distorsione radiale dr sono generalmente espressi dal polinomio di ordine dispari:

$$dr = k_0 r^3 + k_1 r^5 + k_2 r^7 \quad (2.9)$$

dove r è la distanza radiale.

I coefficienti k_i sono generalmente altamente correlati, con l'errore più grande addebitabile al termine cubico, legato a k_0 .

La distorsione tangenziale è dovuta ad un difetto di centratura delle lenti lungo l'asse ottico. I parametri P_1 e P_2 (eq. 2.10) sono fortemente legati a x_p e y_p . La distorsione tangenziale è normalmente più di un ordine di grandezza più piccola della distorsione radiale.

$$P(r) = [(P_1)^2 + (P_2)^2]^{\frac{1}{2}} r^2 \quad (2.10)$$

Come già detto in precedenza, la procedura self-calibration con l'utilizzo dei parametri addizionali, introduce nuove osservazioni e nuove incognite che possono influenzare la qualità del modello funzionale e stocastico. L'uso improprio dei parametri può indebolire il normale sistema di equazioni ed agire sulla quantificazione di tutti i parametri del sistema. Questo succede specialmente quando la geometria per il sistema di calibrazione non è ottimale o c'è la probabilità di un'eccessiva correlazione tra i parametri addizionali e i parametri di orientamento esterno [6].

2.7 La fotogrammetria terrestre per la modellazione 3D

Per molti anni la fotogrammetria ha affrontato il problema riguardante la ricostruzione tridimensionale da immagini. Al giorno d'oggi sono disponibili sul mercato software affidabili. Essi sono basati su procedure manuali o semi-automatiche. Il software Australis utilizzato largamente nelle sperimentazioni presentate nei capitoli successivi, è uno di questi. Dopo le fasi di misurazione dei tie points e di bundle adjustment, è possibile procedere alla calibrazione del sensore e alla ricostruzione di punti oggetto in coordinate tridimensionali.

I processi generali che portano alla modellazione 3D sono caratterizzati da alcuni steps comuni: ricostruzione della geometria del sensore e del network di immagini, misurazioni 3D (nuvole di punti e linee), generazione di mesh e testurizzazione, che effettua la ricostruzione della superficie partendo dalla nuvola di punti.

Attualmente, il recupero della geometria interna del sensore e delle immagini, e la fase di misurazione sono nel complesso separati dalla fase di modellazione e visualizzazione. In molte applicazioni però questo gap deve essere colmato allo scopo di effettuare misurazioni più corrette e recuperare modelli 3D realistici.

Gli step di misurazioni possono essere effettuati in maniera manuale o automatica. Gli algoritmi di matching fotogrammetrico automatico ai minimi quadrati, possono produrre una nuvola densa di punti, ma possono essere presenti nei risultati punti disallineati o zone con assenza di punti, richiedendo un'analisi post processing dei dati. Queste procedure fotogrammetriche non prendono generalmente in considerazione le condizioni geometriche della superficie e lavorano principalmente con vincoli di smoothing. Risulta quindi difficile passare

dalle nuvole di punti generati a strutture poligonali di alta qualità senza perdere informazioni. D'altro canto, se le misurazioni sono fatte in maniera manuale o al più semi-automatica, vi è una più alta affidabilità di misura, ma un numero più piccolo di punti che descrivono l'oggetto. Per l'operatore è quindi importante capire il comportamento funzionale dei software per l'ottenimento di misure affidabili. Nel lavoro di tesi verranno sfruttate le diverse peculiarità dei software nella ricostruzione tridimensionale, tenendo conto dei relativi limiti. Verranno quindi accostate sia metodologie fotogrammetriche di misura manuale e semi-automatica (Australis), sia metodologie completamente automatiche (Agisoft Photoscan):

- Approcci che utilizzano una ricostruzione 3D manuale (Australis): questi approcci effettuano la calibrazione e l'orientazione delle immagini interattivamente o automaticamente, e successivamente effettuano una modellazione semi-automatica facendo affidamento sull'abilità dell'operatore. Gli approcci semi-automatici sono molto comuni, in particolare nella ricostruzione della geometria di oggetti di forma complessa. L'interattività del lavoro è presente nella definizione della topologia dell'oggetto, seguita poi dall'editing e dal post-processing dei dati. In un approccio interattivo, la dimensione reale degli elementi, e la posizione dei sensori vengono catturati assumendo che i parametri di orientamento interno dei sensori siano riconosciuti;
- Approcci che utilizzano una ricostruzione 3D semi-automatica della scena da immagini orientate (Photoscan): la calibrazione e l'orientazione sono effettuate separatamente, in modo interattivo o automatico, mentre la ricostruzione 3D dell'oggetto, basata su vincoli oggetto è completamente automatica.

2.8 Conclusioni

I metodi di Image-based Modeling, ai quali appartiene la fotogrammetria, utilizzano la corrispondenza che esiste tra i punti omologhi di almeno due immagini per ricostruire l'informazione tridimensionale della superficie di un oggetto mediante un preciso modello matematico (principi della triangolazione e della collinearità).

Il maggior vantaggio delle tecniche di rilievo a sensori passivi è dato dalla relativa economicità dei mezzi impiegati. Per essi, infatti, bastano delle normali fotocamere di costo assai contenuto, se paragonato a quello richiesto per l'acquisto di uno strumento per il sistema ottico attivo. L'elevata maneggevolezza, il peso e le dimensioni ridotte delle fotocamere, inoltre, rendono assai agevole la fase di ripresa. Non ultimo, i procedimenti di Image-based Modeling sono in grado di fornire direttamente la tessitura dell'oggetto rilevato arricchendo così il modello di una componente fortemente fotorealistica.

Un limite del metodo è l'elevato grado di esperienza richiesta all'operatore per svolgere in maniera completa il procedimento di modellazione, a cominciare dall'acquisizione dei dati. Le posizioni di presa devono essere pianificate accuratamente, evitando ridondanze inutili di dati o la mancanza della necessaria copertura per l'individuazione dei punti omologhi nei fotogrammi. Tutte le varianti dei procedimenti di Image-based Modeling hanno poi in comune la necessità di numerose e delicate operazioni di elaborazione più o meno manuali (orientamento esterno delle immagini, ricerca di punti omologhi, matching), passaggi complicati e laboriosi, ma fondamentali e necessari per ottenere una nuvola di punti tridimensionale soprattutto quando vengono utilizzate camere non calibrate.

Nuovi sviluppi e strumenti della fotogrammetria affrontano con successo queste problematiche permettendo una fedele ricostruzione 3D, grazie a procedure (manuali o automatiche)

di calibrazione e orientamento dei fotogrammi. Un altro tipo di approccio è quello semiautomatico, che dopo una operazione di calibrazione ed orientamento ricostruisce le superfici del modello con il contributo di un operatore. Questo tipo di procedura è molto più utilizzata, soprattutto per oggetti con geometrie più complesse. Debevec introdusse nel 1996 un sistema ibrido per ricostruire un modello 3D foto-realistico partendo da un set di immagini orientate ed un modello con numero limitato di poligoni. Questo modello, attraverso procedure interattive basate sulla corrispondenza delle immagini proiettate, viene affinato con l'aggiunta di dettagli geometrici.

L'integrazione di metodologie manuali e semi-automatiche viene utilizzata quando non è possibile con un singolo procedimento soddisfare tutti i requisiti progettuali richiesti oppure quando bisogna modellare oggetti complessi e di notevoli dimensioni, per cui una tecnica da sola non è in grado di fornire un modello completo, sufficientemente preciso e dettagliato.

Nel presente lavoro, in una prima fase, viene utilizzato un software con componente manuale preponderante, in cui l'abilità dell'interazione umana è fondamentale. In una fase successiva si renderà necessario l'utilizzo di un software con caratteristiche semi-automatiche, che permette il riconoscimento automatico di una nuvola di punti densa e la modellazione della superficie topografica.

Capitolo 3

Configurazione Sperimentale

3.1 Introduzione

l'apparato sperimentale è stato allestito all'interno del Laboratorio di Idrogeologia del Dipartimento di Geoscienze dell'Università di Padova.

L'apparato è stato pensato e realizzato in maniera tale da poter fare delle osservazioni qualitative e quantitative sulla dinamica degli ammassi granulari.

Per questo motivo la struttura consente di fare due cose fondamentali.

La prima è la simulazione degli eventi, la seconda è l'acquisizione degli stessi mediante le tecniche fotogrammetriche.

Nelle sezioni che seguono vengono presentati i dispositivi che consentono lo svolgimento di entrambe le fasi.

3.2 La canaletta sperimentale

Lo scopo è la generazione, su scala di modello, di fenomeni di movimento di ammassi granulari secchi.

La canaletta sperimentale (Figura 3.1) è costituita da due pendii diversamente inclinati: il piano di monte ha un angolo d'inclinazione superiore all'angolo di natural declivio del materiale coinvolto, il secondo, il piano di valle incernierato al piano di monte, è posto ad una inclinazione inferiore e tale da permettere l'arresto del materiale. I due piani sono realizzati in forex liscio, sostenuti da una struttura in ferro.

L'altezza dei piani rispetto al pavimento è regolabile mediante un pistone idraulico posto sotto la struttura di sostegno.

I piani sono connessi tra loro da una cerniera che permette la reciproca rotazione. Mediante il pistone oleodinamico è possibile variare l'inclinazione dei due piani.

Le inclinazioni stabilite per le prove effettuate sono di $6,5^\circ$ per il piano di valle e $27,75^\circ$ per il piano di monte.

Su entrambi i piani sono stati posizionati due clisimetri che consentono di impostare le inclinazioni (Figura 3.2)

I due piani hanno forma quadrata, il lato ha lunghezza approssimativamente pari a 150cm .

Lungo il bordo del piano di valle sono state montate delle sponde, anch'esse in forex liscio, per contenere il materiale durante le simulazioni.

Particolare cura è stata prestata nella zona di cerniera tra i due piani, dove avviene il cambio di pendenza. L'osservazione sperimentale mostra come la forma geometrica di questa zona influisca in maniera significativa sull'evoluzione del moto. La zona di passaggio dal

piano di monte a quello di valle è stata quindi modellata con del nastro adesivo e mantenuta costante in tutte le prove effettuate.

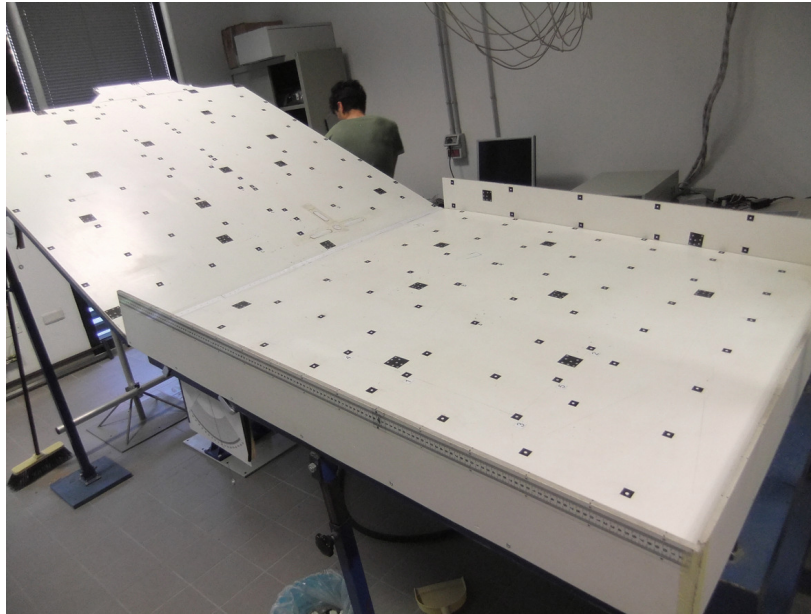


Figura 3.1: La canaletta sperimentale utilizzata in laboratorio per la generazione di fenomeni di dinamica di ammassi granulari secchi.

3.2.1 La canaletta sul piano di monte

Per le prove su pendio incanalato sono state realizzate due pareti in plexiglass da fissare sul fondo mediante viti passanti. Una paratoia a rimozione manuale, alloggiata dentro gargami realizzati nelle pareti, è stata utilizzata per permettere l'accumulo del materiale granulare a monte e il rilascio impulsivo dello stesso.

Il canale ha sezione trasversale rettangolare, con base 20cm e con altezza di 15cm (Figura 3.3).

3.2.2 Il contenitore di forma troncoconica

Per le prove su pendio aperto è stato usato un contenitore di forma troncoconica in ferro (Figura 3.4), anche questo ad azionamento manuale. Il diametro maggiore è pari a 41.0cm , la altezza è pari a 12.0cm , l'inclinazione delle pareti laterali è pari a 50.35° .

3.2.3 Il deviatore di flusso

Parte delle prove su pendio incanalato sono state svolte con la presenza di un deviatore di flusso.

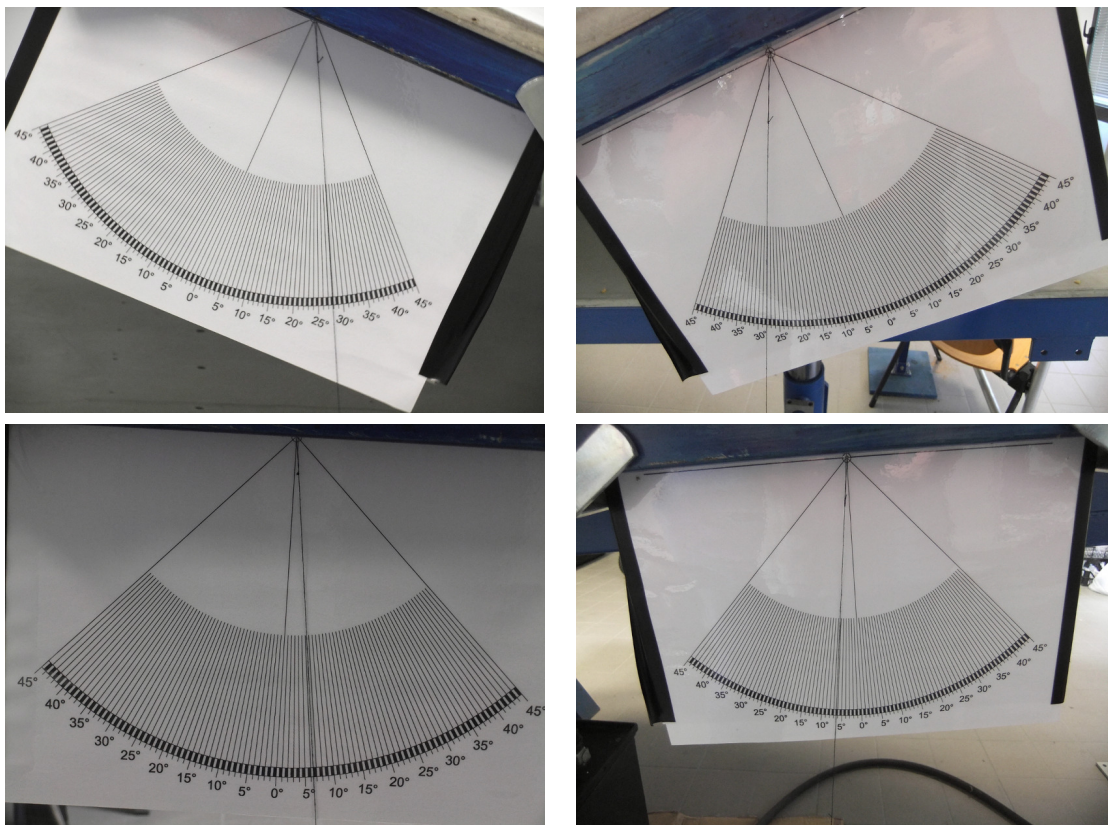


Figura 3.2: I clisimetri utilizzati per la misura della inclinazione del piano di monte e di valle: in alto, i due clisimetri montati sulla struttura di sostegno del piano di monte (a destra e a sinistra del piano di monte); in basso, i due clisimetri montati sulla struttura di sostegno del piano di valle.

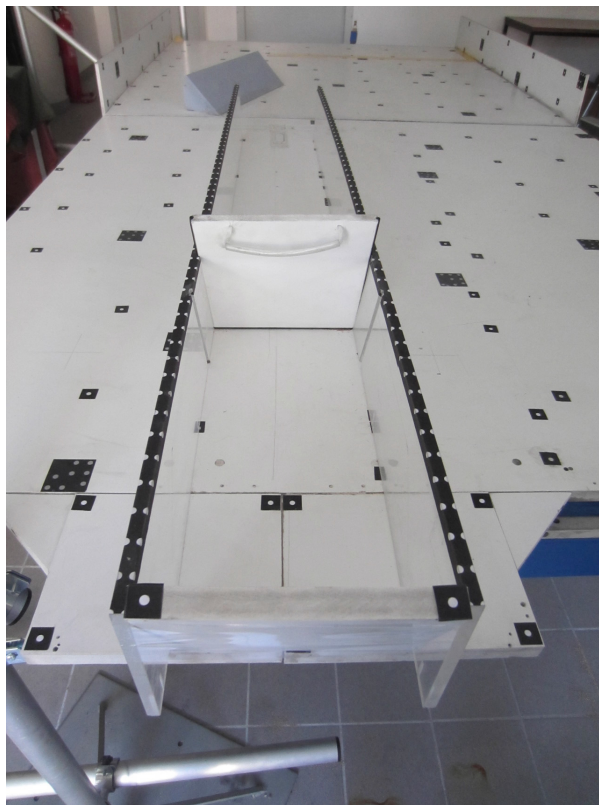


Figura 3.3: Il canale a sezione rettangolare ricavato sul piano di monte e la paratoia a rimozione manuale.

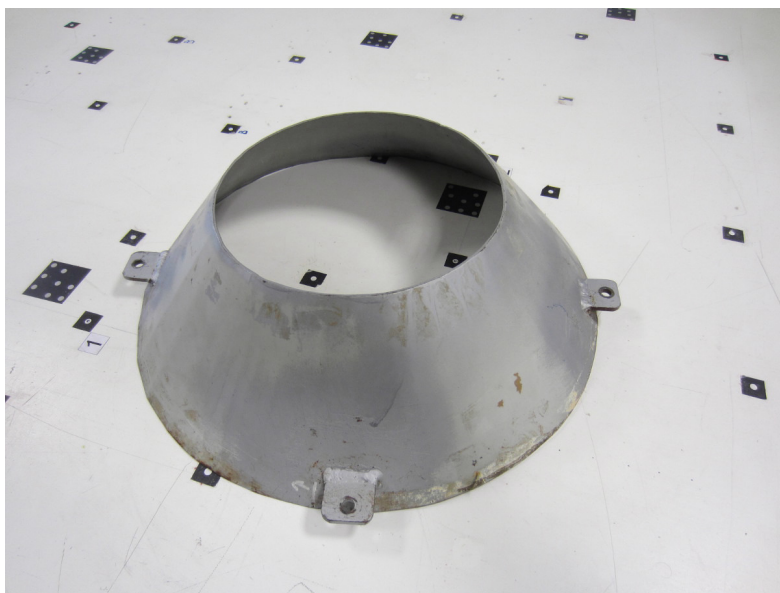


Figura 3.4: Il contenitore troncoconico utilizzato nelle prove su pendio aperto.

Il deviatore simula, sul modello, un'opera di difesa in grado di rallentare e deviare il flusso di materiale. Questo è stato realizzato in legno, ha una altezza di 10.5cm , una lunghezza di 51.4cm e inclinazione di 45° .

Il dispositivo è stato fissato sul piano di valle subito dopo il cambio di pendenza. L'angolo tra il deviatore e la linea del cambio di pendenza è di 65° (Figura 3.5).

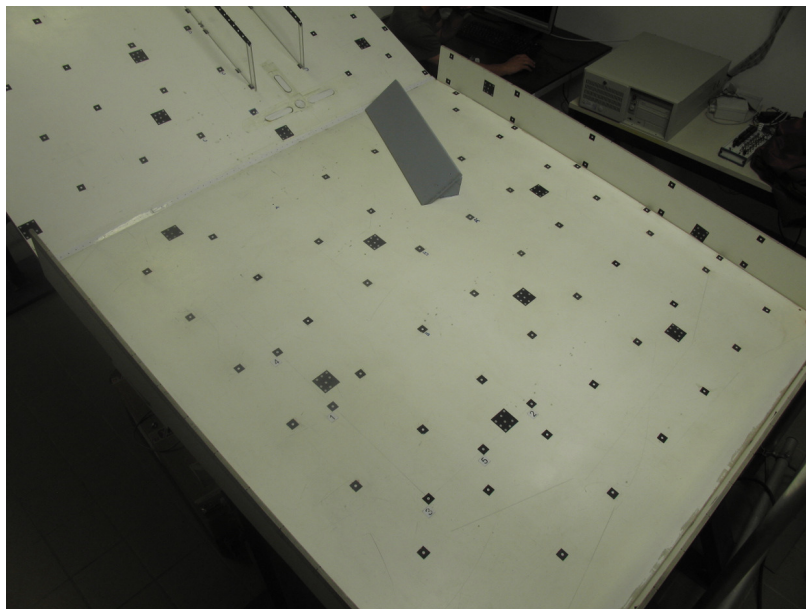


Figura 3.5: Il deviatore di flusso installato sul piano di valle della canaletta sperimentale.

3.3 Apparato fotogrammetrico

Per l'esecuzione delle prove sperimentali sono state utilizzate otto videocamere, fissate ad una struttura reticolare sopra la canaletta (Figura 3.6). La quota del tubo di supporto rispetto alla canaletta è regolabile in maniera da poterla adeguare alle proprietà ottiche delle videocamere utilizzate. La stessa struttura sostiene due illuminatori che garantiscono la necessaria illuminazione della scena.

Il fissaggio delle videocamere alla tubazione di supporto è assicurato da un dispositivo che permette la rotazione tridimensionale delle videocamere (Figura 3.7). Ogni videocamera è alimentata indipendentemente e collegata al sistema di acquisizione.

3.3.1 Le videocamere

Le otto videocamere utilizzate sono del tipo Basler Ace GigE a focale fissa, quattro hanno una lunghezza focale dichiarata di 8mm , due di 6mm e due di 12mm (Figura 3.8).

Le caratteristiche rilevanti delle videocamere agli scopi del presente lavoro sono le seguenti (Figura 3.9):



Figura 3.6: L'impalcatura di sostegno delle videocamere e degli illuminatori.



Figura 3.7: Una videocamera e il dispositivo di supporto a movimentazione tridimensionale.

- *Resolution*: è il numero di pixel del CCD, in direzione orizzontale e verticale, e fornisce una misura della risoluzione dell'immagine che può essere ottenuta;
- *Sensor Technology*: il CCD adottato è del tipo *Progressive scan*. Questa tecnologia permette di visualizzare l'immagine riga per riga (a differenza della tecnologia *Interlaced Scan*) ad intervalli di un sessantesimo di secondo. Le righe vengono disposte sullo schermo in tempo reale e in una sequenza ordinata, eliminando il problema dello sfarfallio presente con la tecnologia *Interlaced*. Questo tipo di tecnologia è particolarmente utile quando sia necessario visualizzare in dettaglio immagini in movimento, come nel nostro caso;
- *Sensor Size*: è il parametro utilizzato per definire la dimensione del CCD, nel caso attuale 1/1.8". Da questo parametro si possono ricavare parametri come l'*aspect ratio* pari a 4 : 3, la lunghezza della diagonale , 8.93 mm, la larghezza, 7.18 mm, e la altezza, 5.32 mm;
- *Pixel Size*: misura in μm dei lati del singolo pixel. I pixel nel nostro caso sono quadrati;
- *Max Frame Rate*: esprime il numero massimo di acquisizioni che la videocamera può eseguire in un secondo, alla massima risoluzione;
- *Mono/Color*: le videocamere acquisiscono immagini in scala di grigi; questo aumenta la risoluzione dell'immagine.



Figura 3.8: Le videocamere modello Ace GigE Basler utilizzate nelle realizzazioni sperimentali.

Specifications		GIG VISION				
Basler ace	acA1300-30gm/gc	acA1280-60gm/gc	acA1300-60gm/gc	acA1300-60gmNIR	acA1600-20gm/gc	acA1600-60gm/gc
Camera						
Resolution (H x V pixels)	1296 x 966	1280 x 1024	1280 x 1024	1280 x 1024	1628 x 1236	1600 x 1200
Sensor	Sony ICX445	EV76C560	EV76C560	EV76C661	Sony ICX274	EV76C570
Sensor Size (optical)	1/3"	1/1.8"	1/1.8"	1/1.8"	1/1.8"	1/1.8"
Sensor Technology	Progressive Scan CCD	CMOS, rolling shutter	CMOS, global shutter	CMOS, global shutter	Progressive Scan CCD	CMOS, global shutter
Pixel Size (μm)	3.75 x 3.75	5.3 x 5.3	5.3 x 5.3	5.3 x 5.3	4.4 x 4.4	4.5 x 4.5
Frame Rate	30	60	60	60	20	60
Mono / Color	Mono / Color (NIR models: Mono only)					
Video Output Format	Mono 8, Mono 12, Mono 12 Packed, YUV 4:2:2 Packed, YUV 4:2:2 (YUYV) Packed, Bayer BG 8, Bayer BG 12, Bayer BG 12 Packed / in addition: Bayer GB (Aptina), Bayer GR (CMOSIS)					
Interface	Fast Ethernet (100 Mbit/s) or Gigabit Ethernet (1000 Mbit/s)					
Synchronization	Via external trigger, via the Ethernet connection or free run					
Exposure Control	Via external trigger or programmable via the camera API					

Figura 3.9: Specifiche delle videocamere Basler acA 1600-20 gm/gc.

3.3.2 Gli illuminatori

Gli illuminatori sono del tipo Lupo Quadrilight con frequenza nominale di $48.000Hz$ che assicurano una continua ed omogenea illuminazione della scena. Il dato relativo alla frequenza di emissione è molto importante in quanto determina, insieme ad altri parametri, la quantità di luce che giunge all'interno dell'obiettivo delle videocamere.

3.3.3 La luce disponibile per i fotogrammi

La quantità di luce che giunge all'obiettivo delle videocamere dipende da tre parametri: tempo di esposizione, l'apertura del diaframma e la luce ambientale. I primi due sono propri delle videocamere mentre il terzo è la sintesi di tutte le sorgenti luminose presenti nel laboratorio.

La corretta illuminazione dei fotogrammi dipende da un buon equilibrio tra questi tre parametri. Il tempo di esposizione, è il tempo durante il quale l'otturatore della macchina fotografica rimane aperto per permettere alla luce di raggiungere la pellicola o il sensore (il nostro CCD).

Il diaframma è un apertura solitamente circolare o poligonale, situata in corrispondenza del centro ottico dell'obiettivo, che ha il compito di controllare la quantità di luce che raggiunge la pellicola (in una fotocamera convenzionale) o i sensori (in una fotocamera digitale) nel tempo in cui l'otturatore resta aperto (tempo di esposizione).

La maggior parte delle fotocamere dispone di un diaframma di ampiezza regolabile (simile, per funzione, all'iride dell'occhio) contenuto nell'obiettivo. La regolazione del diaframma si chiama apertura. A piena apertura il diaframma lascia passare, in un dato tempo quanta più luce possibile verso il supporto sensibile. Chiudendo il diaframma si riduce tale quantità di luce. Quindi a parità di esposizione, un tempo breve richiede un diaframma più aperto, mentre un tempo lungo si abbina ad un diaframma più chiuso. Nel nostro caso per ottenere immagini di qualità va tenuto conto di un ulteriore parametro, il tempo di acquisizione, ovvero la frequenza con la quale vengono scattate le fotografie che riprendono l'ammasso in movimento. Tra i quattro parametri menzionati il primo ad essere considerato è proprio il tempo d'acquisizione, in quanto determina gli istanti di ricostruzione della forma tridimensionale dell'ammasso in movimento. Scelto questo, si trova il giusto equilibrio tra gli altri parametri.

Nel presente lavoro i fotogrammi sono stato ottenuti con un tempo di esposizione di $0.0003s$, con il diaframma delle videocamere completamente aperto, con entrambi gli illuminatori accesi e con una frequenza di acquisizione di $15Hz$.

3.4 Sistema d'Acquisizione

La fase di acquisizione è gestita da un pc sul quale è stato installato il programma Labview. Un codice realizzato appropriatamente permette la gestione dei tempi di trigger delle otto videocamere (Figura 3.10). Il software e l'hardware sono in grado di gestire l'archiviazione contemporanea dei frame provenienti dalle otto videocamere in tempo reale (fino a circa 3 Gbit/s).



Figura 3.10: La scheda National Instrument utilizzata per la gestione della contemporanea attivazione delle videocamere.

3.4.1 Il software LabView

LabView è un potente software dedicato al controllo e alla gestione di sistemi per l'acquisizione di dati scientifici.

Per soddisfare le specifiche esigenze richieste nel nostro laboratorio, il software è stato appositamente programmato.

Il codice controlla i seguenti dispositivi hardware.

- un modulo principale per il controllo dei Task di acquisizione e archiviazione e per il comando della generazione dell'impulso di trigger;
- otto moduli di acquisizione immagine triggerata da telecamera (le immagini acquisite vengono salvate su buffer di memoria);
- otto moduli di archiviazione immagini. Per l'archiviazione delle immagini viene utilizzata una tecnica stream to disk, velocizzando l'archiviazione delle immagini;
- un codice per la lettura degli archivi binari e l'archiviazione delle singole immagini in formato JPG, BMP oppure TIFF.

Le finestre d'interfaccia che sono state utilizzate sono due. La prima permette di gestire l'intero processo d'acquisizione, la seconda consente di convertire i fotogrammi nel formato desiderato. L'interfaccia d'acquisizione è presentata in (Figura 3.11). La finestra utente dispone di diversi comandi. Quelli di maggior interesse sono:

- *QueueSize*: dimensione del buffer dove vengono memorizzate le immagini acquisite dai Task di Acquisizione. Ciascun Task ha un proprio buffer a disposizione;
- *ArchivioIMGBinarie*: cartella su disco dove vengono salvati i file binari con le immagini acquisite;
- *Path dir vi*: cartella su disco da dove il programma principale carica i Task di Acquisizione e Archiviazione;
- *Channel Parameters*: parametri per il funzionamento del segnale di trigger. Si utilizza il counter ctr0 della scheda NI PCI-6602. Per default la frequenza del segnale di trigger è pari a 20 Hz. Il segnale di trigger viene “smistato” all’opportuno ingresso delle telecamere (Ingresso di Trigger). Il frame rate è pari alla frequenza del segnale generato dal counter;
- *DataInTask*: parametri di controllo del funzionamento dei Task di Archiviazione. *File* definisce il numero di file che saranno archiviati da ciascun Task. *ImgForFile* definisce il numero di immagini che saranno archiviate su ciascun file.
- *Data*: informazioni sul funzionamento dei Task.

All’avvio del programma, vengono caricati ed eseguiti i Task di Acquisizione ed Archiviazione. Vengono allocate le risorse per l’acquisizione immagine (le telecamere vengono configurate per ricevere l’evento di trigger per il frame).

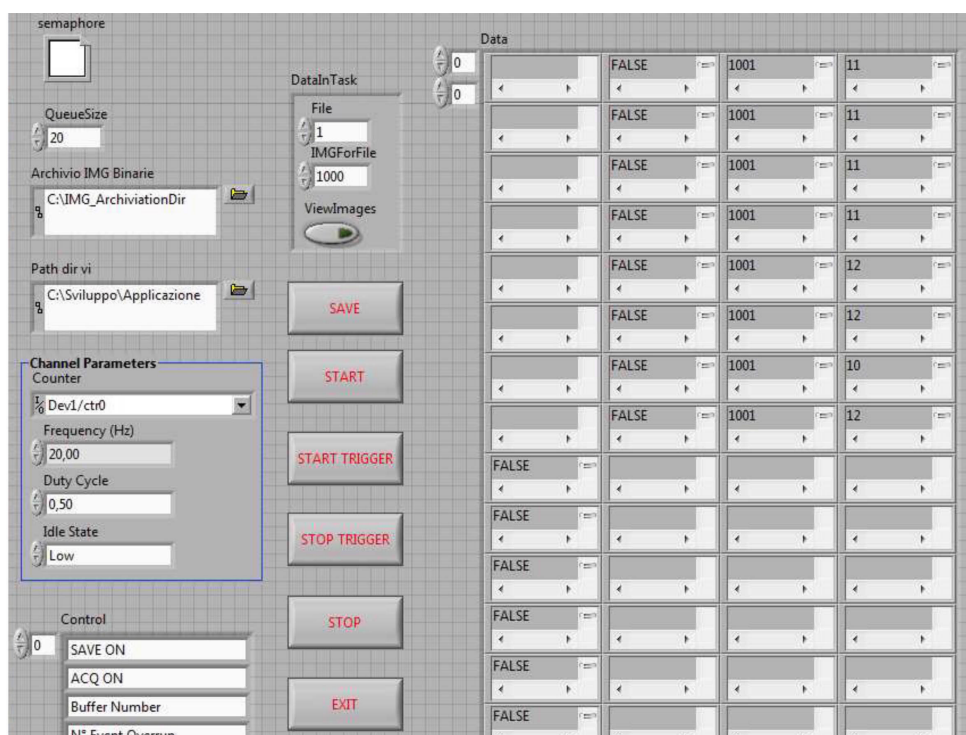


Figura 3.11: Interfaccia software del codice d’acquisizione e archiviazione delle immagini.

La acquisizione si sviluppa secondo le seguenti fasi:

- premere il tasto **“SAVE”**: vengono creati su disco i file richiesti per ciascuna telecamera. I file di acquisizioni precedenti vengono cancellati. L'operatore ha un feedback del comando dalla prima colonna della matrice Data: devono essere presenti 8 voci TRUE. In caso contrario, significa che alcuni Task non hanno ricevuto il comando ed è necessario premere nuovamente il tasto SAVE;
- premere il tasto **“START”**: le telecamere sono poste in modalità “acquisizione”. Le telecamere iniziano ad acquisire immagini comandate dal segnale di trigger;
- premere il tasto **“START TRIGGER”**: le telecamere ricevono il segnale di trigger alla frequenza impostata ed iniziano ad acquisire frame, che vengono successivamente bufferizzati in memoria ed archiviati dai Task di Archiviazione. L'operatore ha un feedback del comando dalla terza colonna della matrice Data: il numero di frame acquisiti aumenta;
- Il programma acquisisce ed archivia le immagini nei file binari previsti. Al raggiungimento del numero di immagini previste per file, il programma passa automaticamente ad archiviare le immagini nel file successivo (se File è maggiore di 1);
- premere il tasto **“STOP TRIGGER”**: le telecamere non ricevono il segnale di trigger e non acquisiscono più frame. L'operatore ha un feedback del comando dalla terza colonna della matrice Data: il numero di frame acquisiti non aumenta;
- premere il tasto **“STOP”**: le telecamere sono poste in modalità “idle”. Le risorse di acquisizione e archiviazione vengono rilasciate;
- premere il tasto **“EXIT”** per iniziare una nuova acquisizione e riavviare il programma. In questo modo si è sicuri del corretto rilascio delle risorse hardware.

La seconda finestra permette invece di convertire le immagini nel formato desiderato.

3.4.2 Software Measurement&Automation

Questo software consente di vedere sullo schermo del pc, ciò che ciascuna videocamera sta inquadrando.

Le funzioni principali sono due *Grab e Snab*. Nel momento in cui si clicca sulla funzione *Snab* viene acquisito un fotogramma relativo all'istante del click. Con il *Grab* invece l'immagine viene aggiornata continuamente, questa funzione è stata utilizzata per dare istruzioni precise sul posizionamento delle videocamere, in maniera da perfezionare le inquadrature.

Oltre a queste funzioni, è possibile settare alcuni parametri importanti della videocamera come il tempo d'esposizione.

Il programma non consente un controllo multiplo sui dispositivi per cui ogni videocamera viene gestita singolarmente.

Capitolo 4

Calibrazione degli obiettivi

4.1 Introduzione

Sulla base delle conoscenze teoriche acquisite nel campo della fotogrammetria e del sistema hardware e software disponibile è stata eseguita la calibrazione delle ottiche delle otto videocamere Basler e della macchina fotografica Canon Powershot Pro1.

La calibrazione era già stata eseguita da Dallavalle [4] ma il tempo ormai trascorso (qualche anno) ha fatto ritenere necessaria la ripetizione della procedura. E questo per almeno tre ragioni.

La prima è legata all'importanza della ricostruzione fotogrammetrica. Se l'obbiettivo è quello di confrontare i risultati fotogrammetrici con quelli numerici, è necessario minimizzare gli errori. L'intero processo di analisi fotogrammetrica è articolato su molte fasi ciascuna delle quali è una potenziale fonte d'errore. Tra queste fonti la stima dei parametri di calibrazione ha una significativa importanza. Considerando che nell'arco di qualche anno è ragionevole attendere differenze nei valori di questi parametri, è stato ritenuto corretto ripetere la misura

La seconda ragione è una conseguenza della prima e attiene alla volontà di approfondire la conoscenza della strumentazione utilizzata verificando la eventuale variazione della taratura nel tempo e ricercandone le cause. È una ragione che soddisfa quindi a un'interesse scientifico ma che spesso è essenziale anche ai fini pratici in quanto permette di acquisire maggiore sensibilità sul funzionamento delle apparecchiature e sulle possibili problematiche legate al loro utilizzo.

L'ultima ragione è didattica, i problemi teorici e pratici affrontati hanno permesso di sviluppare una migliore conoscenza dell'argomento e alcune possibili soluzioni per ottenere quanto desiderato.

4.2 Target retroriflettenti

Un requisito base della fotogrammetria è quello di poter disporre di punti omologhi.

Questi punti devono poter essere riconosciuti dal software, per poter svolgere i processi automatici, e dall'operatore per i processi manuali.

Il software utilizzato per la calibrazione è Australis. Le sue caratteristiche sono già state brevemente presentate nel capitolo dedicato alla fotogrammetria. La casa produttrice fornisce insieme al software anche dei target retroriflettenti con misure standardizzate.

In fase di calibrazione i marker retroriflettenti (quadrati di area pari a $21,16\text{cm}^2$, contenenti elementi circolari riflettenti di diametro 6mm) sono stati utilizzati come punti omologhi

(Figura 4.1). Ogni marker ha una diversa disposizione dei punti riflettenti, a distanza nota, e questo consente al software di associare ad ogni marker il suo codice identificativo.

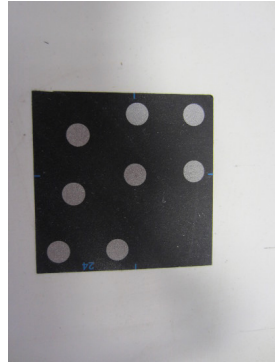


Figura 4.1: Esempio di marker retroriflettente utilizzato in abbinamento con il software Australis per la determinazione dei parametri di calibrazione delle ottiche delle videocamere e della macchina fotografica Canon Powershot Pro1.

4.3 Procedura di calibrazione

4.3.1 Fase 1: acquisizione dei fotogrammi

La prima fase consiste nell'acquisizione di un certo numero di fotogrammi per videocamera.

Dopo alcune prove preliminari utili per testare l'efficacia dell'apparato di acquisizione, si è pensato di minimizzare i tempi dell'operazione sfruttando le potenzialità di gestione del software LabView, attuando un'acquisizione continua di fotogrammi alla frequenza di 2 Hertz.

Nella modalità operativa adottata l'operazione richiede la presenza di due persone: la prima avvia e arresta l'acquisizione; la seconda assicura, muovendo e ruotando la videocamera, la molteplicità dei punti di vista necessaria per l'analisi fotogrammetrica.

Nella configurazione iniziale i marker sono stati distribuiti in una regione limitata del piano di valle della canaletta.

4.3.2 Fase 2: caricamento dei fotogrammi in Australis

Prima di caricare le immagini Australis richiede che venga specificato il nome della videocamera.

Il programma dispone di un proprio database con diversi modelli di videocamera. Se le camere da calibrare non rientrano nel database, il software chiede all'utente di inserire la lunghezza focale. Non avendo ancora calibrato l'ottica, va inserito il valore nominale.

Una volta salvata la nuova camera è possibile procedere con l'inserimento dei fotogrammi acquisiti. Successivamente viene attivata la funzione *Autocal* disponibile dal menù *Photogrammetry*. Mediante questa funzione il software risolve le equazioni per l'orientamento interno ed esterno. Un'ulteriore finestra, che si apre dopo aver avviato *Autocal*, fornisce all'utente la possibilità di attivare il processo di Bundle Block Adjustment.

4.3.3 Fase 3: risultati dal processamento automatico

Dopo aver lanciato la procedura automatica di Autocal, il programma presenta i risultati dell'elaborazione. Oltre a fornire i risultati numerici dei parametri cercati, il software mette in evidenza, usando diversi colori, quali punti è stato in grado di referenziare.

Il numero di target riconosciuti dipende da numerosi fattori tra cui:

- l'illuminazione dell'area;
- la riflessione della superficie sulla quale sono posti i target retroriflettenti;
- il numero dei target retroriflettenti;
- l'orientazione dei fotogrammi;
- il numero dei fotogrammi.

Le tre fasi descritte sono state ripetute variando i parametri appena menzionati.

Nella configurazione finale, è stato sufficiente il primo processamento per avere il riconoscimento e la referenziazione di tutti i target.

Parlando in termini fotogrammetrici, in questa configurazione tutti i target sono riconosciuti automaticamente come punti omologhi, senza il bisogno di attuare una referenziazione manuale per migliorare il risultato.

La posizione in termini di coordinate (X, Y, Z) dei punti omologhi è indispensabile per stimare i parametri di calibrazione $(c, xp, yp, k1, k2, k3, p1, p2)$

Interpretazione dei colori utilizzati da Australis.

Relativamente all'uso dei colori, dalle indicazioni presenti nel manuale [2] e dall'esperienza maturata è possibile trarre le informazioni che seguono:

- punto arancione: il punto è stato riconosciuto in alcune immagini, è pertanto visto come punto omologo, ma compare in un numero di immagini inferiore al limite minimo consentito, il limite minimo è modificabile nella finestra *Settings* della funzione *Bundle*;
- croce rossa sopra il punto: il punto è referenziato in un numero sufficiente di immagini ma presenta un errore eccessivo rispetto all'errore ammesso nella finestra *Settings* della funzione *Bundle*;
- punto bianco: il colore viene assegnato in fase di referenziazione manuale quando viene assegnato un codice al punto;
- punto giallo: il colore viene assegnato quando il punto viene selezionato;
- punto verde: il punto è correttamente referenziato, contribuisce quindi alla definizione 3D dell'oggetto.

4.3.4 Condizioni di ripresa ottimali

La migliore distribuzione dei marker, allo scopo della calibrazione delle ottiche, è del tipo visibile in Figura 4.2.

In questa configurazione sono state prese mediamente 60 foto per videocamera. In ogni foto sono ripresi mediamente 10 marker.

È importante variare continuamente l'angolo di ripresa della camera dato che, se l'angolo tra due fotogrammi è inferiore a 3° , il programma non permette la referenziazione tra i due.

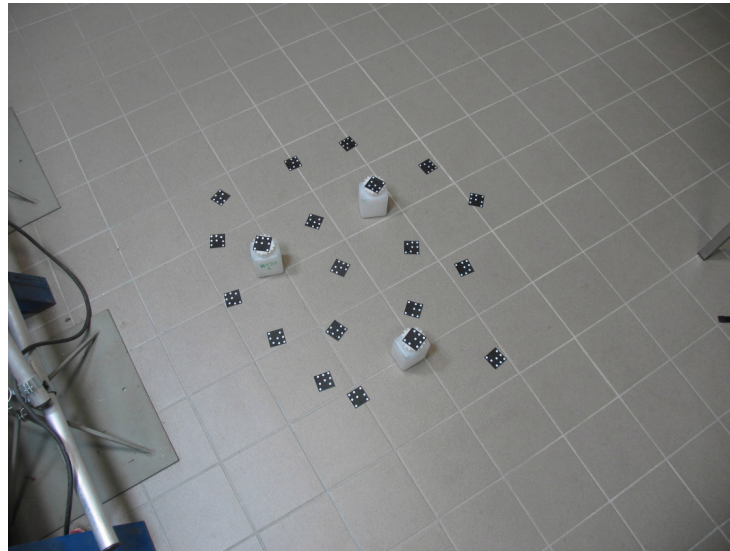


Figura 4.2: Sistemazione dei marker retroriflettenti nella configurazione che ha dato i migliori risultati,

4.4 Risultati della calibrazione

Nella Tabella 4.1 sono presentati i valori dei parametri di taratura delle videocamere. I risultati si discostano moderatamente dai valori nominali, mentre sono piuttosto simili ai valori ottenuti dal Dallavalle nel 2014 [4].

Durante le prime elaborazioni eseguite per la determinazione dei valori dei parametri di taratura non è stata fornita la corretta dimensione del pixel della CCD delle videocamere ($0.0044mm$). Conseguentemente, il software ha elaborato i valori dei parametri con il valore di default, pari a $0.005mm$. I valori dei parametri determinati, sotto queste condizioni, sono quelli mostrati in Tabella 4.2, molto discosti dai valori nominali. Sono state fatte varie ipotesi e vari test per cercare di giustificare una così significativa differenza tra i valori ottenuti e i valori nominali. Tra questi è stato verificato la sostanziale ininfluenza della temperatura di lavoro delle videocamere, piuttosto elevata dopo qualche tempo dalla loro attivazione.

I risultati della calibrazione della videocamera Canon Powershot Pro1 sono riportati in (Figura 4.3).

n° cam	0	1	2	3	4	5	6	7
c(mm)	12	6	8	8	8	12	6	8
c_{cal} (mm)	12.8013	6.1847	8.3013	8.3281	8.2958	12.7335	6.1835	8.3303
xp (mm)	-0.0285	-0.0339	-0.0237	-0.0883	-0.0462	0.0181	-0.1264	0.0874
yp (mm)	0.1293	0.0908	0.0593	0.0366	0.0278	0.2015	0.0702	-0.0486
k1	6.20E-04	9.30E-03	1.47E-03	1.75E-03	1.57E-03	6.00E-04	9.24E-03	1.45E-03
k2	-1.67E-05	6.40E-05	-3.28E-05	-5.80E-05	-3.96E-05	-1.52E-05	8.34E-05	-3.36E-05
k3	3.65E-08	3.09E-06	-1.00E-06	-8.56E-08	-6.70E-07	-1.61E-08	2.11E-06	-8.98E-07
p1	-1.91E-05	-6.57E-05	4.00E-05	1.66E-04	-1.13E-04	5.92E-05	-9.15E-05	2.12E-04
p2	-1.29E-05	1.54E-04	1.69E-04	-1.99E-04	1.29E-04	9.19E-05	2.98E-05	-1.16E-04

Tabella 4.1: Parametri di calibrazione delle videocamere Basler Ace GigE: ncam identifica la videocamera, c è la distanza focale nominale; c_{cal} è il valore ottenuto dopo la calibrazione svolta; xp e yp sono le coordinate del punto principale sull'immagine; k1, k2, k3 sono i parametri di distorsione radiale; p1 e p2 sono i parametri di distorsione tangenziale.

n° cam	c(mm)	c_{cal} (mm)	S.E. (mm)
0	12	14.547	0.006
1	6	7.028	0.002
2	8	9.432	0.004
3	8	9.464	0.002
4	8	9.426	0.003
5	12	14.469	0.007
6	6	7.032	0.003
7	8	9.467	0.004

Tabella 4.2: Distanze focali delle videocamere Basler Ace GigE con dimensione pixel non corretta e pari a 0.005 mm. ncam è il numero che identifica le videocamere, c è il valore nominale della distanza focale, c_{cal} è il valore ottenuto dopo la calibrazione svolta. S.E è l'errore standard.

Canon Powershot Pro 1		
Parametri di calibrazione	S.E. (mm)	
c (mm)	7.2	n.d
c_{cal} (mm)	7.4631	0.002
xp (mm)	-0.2087	0.003
yp (mm)	0.0809	0.003
k1	2.98E-03	4.25E-05
k2	-1.19E-05	4.01E-06
k3	-1.33E-06	1.10E-03
p1	4.97E-04	1.28E-05
p2	-6.69E-05	1.24E-05

Tabella 4.3: Parametri di calibrazione per la videocamera Canon Powershot Pro1: distanza focale nominale c; distanza focale calibrata c_{cal} ; coordinate del punto principale sull'immagine xp e yp; parametri di distorsione radiale k1, k2, k3; parametri di distorsione tangenziale p1 e p2.

Capitolo 5

Ricostruzioni 3D della Canaletta

5.1 Introduzione

Nel capitolo sono descritte le fasi attuate per la riproduzione tridimensionale della canaletta nelle varie configurazioni. Le elaborazioni fotogrammetriche della canaletta sono state compiute totalmente con il software Australis.

5.2 Sistemazione dei Marker retroriflettenti e dei Control Points

I Marker e i Control Points sono stati distribuiti sulla superficie della canaletta (Figura 5.1) in modo omogeneo al fine di uniformare la qualità della ricostruzione fotogrammetrica. La superficie adesiva di cui sono dotati ha permesso un adeguato fissaggio alla canaletta. La superficie dei Control Point ha area di 4cm^2 , sfondo scuro e bersaglio chiaro circolare di diametro 6mm (stessa dimensione del bersaglio dei Marker Australis).

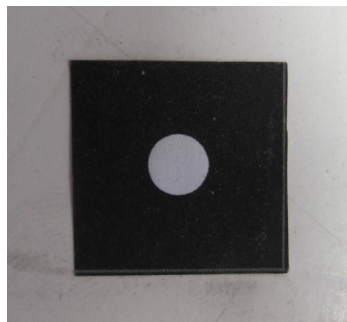


Figura 5.1: Esempio di Control Point, realizzato in proprio, di dimensioni pari ai bersagli dei Marker Australis.

I marker sono gli stessi utilizzati in fase di calibrazione.

Con il fine di verificare la possibilità di ottenere una adeguata ricostruzione delle pareti laterali del piano di valle, i Control Points sono stati distribuiti anche sulla parte interna delle stesse.

5.3 Sistema di riferimento sulla canaletta

Il sistema di riferimento della canaletta è stato collocato sul piano di valle in un'area che non veniva occupata dal materiale in movimento, in modo da garantire la sua visibilità durante i test.

In Figura 5.2 è mostrata la posizione del sistema di riferimento. L'origine è stata fatta coincidere con il centro di un Control Point. Dall'origine sono stati tracciati, con l'aiuto di una squadra, gli assi x e y ortogonali tra loro. L'asse x è orientato verso il centro della canaletta, l'asse y è rivolto verso monte. L'asse z , perpendicolare al piano contenente x e y , ha verso rivolto in alto, seguendo la regola della mano destra. Altri Control Points sono stati utilizzati per descrivere le direzioni di x e di y (punti 5, 2 e 1, 4 di Figura 5.2).

La funzione 321 di Australis permette di inserire il punto assegnato all'origine del sistema di riferimento, un punto nella direzione di x e un punto nella direzione di y e le distanze tra l'origine e il punto lungo x e tra l'origine e il punto lungo y . L'assegnazione degli identificatori del sistema di riferimento avviene solo se i punti sono già referenziati, pertanto l'acquisizione del sistema di riferimento da parte del software avviene solo dopo l'analisi fotogrammetrica delle immagini.

La misura della distanza lungo l'asse x (distanza 3 \rightarrow 2 pari a $350.5mm$) e lungo l'asse y (distanza 3 \rightarrow 1 pari a $301.5mm$) è stata eseguita con una squadra millimetrata metallica. L'errore che può essere attribuito alla misura (combinazione dell'errore di lettura e dell'errore dello strumento) è dell'ordine di $\pm 0,5mm$. Una stima del massimo errore nella misura delle distanze che può essere compiuto a causa di un non corretto inserimento della distanza tra i Control Points di riferimento è dell'ordine di $\pm 5mm$ (considerando una distanza di $3000mm$).

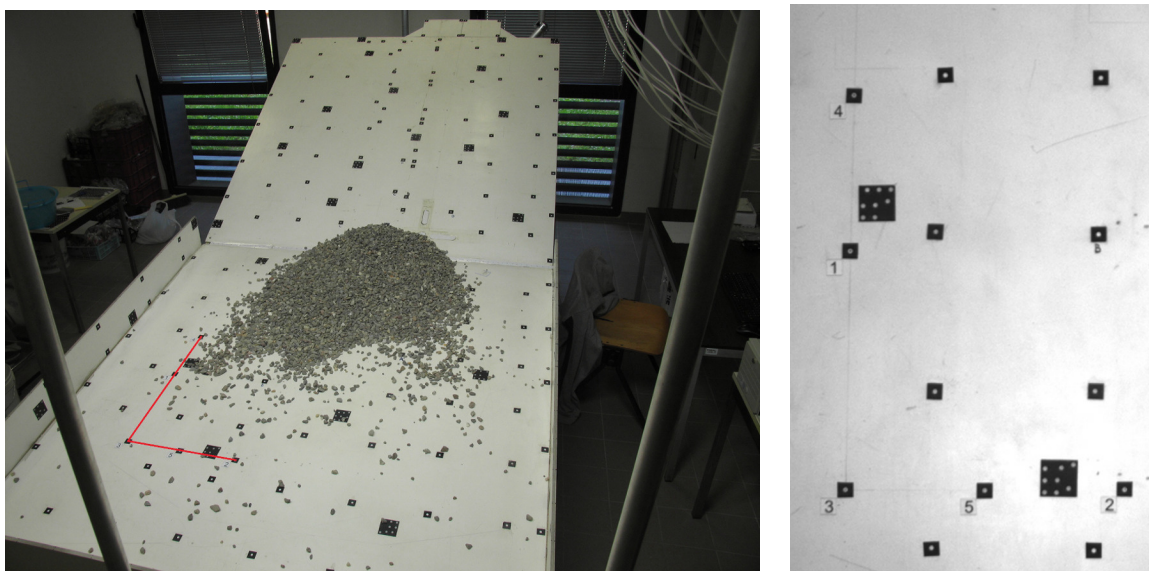


Figura 5.2: A sinistra: posizione del sistema di riferimento sul piano di valle della canaletta. A destra: vista della canaletta con evidenziazione del sistema di riferimento.

5.4 Disposizione delle videocamere

Le videocamere sono state disposte con una configurazione a volo d'uccello sfruttando l'apposita impalcatura.

Nel disporle si è tenuto conto delle rispettive lunghezze focali: le videocamere con distanza focale minore sono state collocate più vicino alla canaletta, quelle con distanza focale maggiore a distanza maggiore. Ogni area di interesse della canaletta è stata coperta con almeno tre videocamere.

5.5 Ricostruzione fotogrammetrica della canaletta

5.5.1 Doppio piano inclinato

Questa configurazione corrisponde al doppio piano inclinato. La ricostruzione fotogrammetrica è stata ottenuta sia utilizzando i fotogrammi delle videocamere che le foto realizzate con la camera Canon. In questa seconda ricostruzione è stato possibile riprodurre l'intera canaletta, cosa non possibile con le videocamere a causa della limitata area adeguatamente coperta.

In quanto segue vengono presentate le fasi di lavoro intraprese, i problemi incontrati, il confronto tra le due ricostruzioni.

Fase 1: acquisizione dei fotogrammi

Dopo aver posizionato le videocamere è stato avviato il software LabView per l'acquisizione automatica dei fotogrammi. Per ogni videocamera è stato acquisito un fotogramma.

Fase 2: referenziazione automatica

Gli otto fotogrammi sono stati caricati in Australis e ad ogni fotogramma è stata associata la videocamera di provenienza con i parametri di calibrazione relativi. L'uso della funzione *Autoreference* permette di referenziare i punti omologhi riconosciuti nei vari fotogrammi in modo automatico dal software senza modificare i parametri della calibrazione (come fatto dalla funzione *Autocal*).

Il risultato della referenziazione automatica non risulta di grande qualità a causa della bassa numerosità dei fotogrammi utilizzati.

Fase 3: referenziazione manuale

Mediante questa fase il software delega all'utente il compito di completare la referenziazione dei punti che, nel processamento automatico, non è riuscito a riconoscere.

Operativamente il software gestisce questa fase consentendo all'utente di referenziare ogni punto singolarmente da un'immagine all'altra. Ad ogni nuovo collegamento effettuato il software aggiorna la situazione complessiva.

Nella finestra *setting* della funzione *Bundle* è stato scelto di assegnare il numero tre al parametro che identifica il numero minimo di fotogrammi che riprendono un punto utile per la ricostruzione. Le zone d'interesse ai fini fotogrammetrici sono riprese da almeno tre videocamere.

Questa è la fase più delicata del processo di restituzione fotogrammetrica con Australis, nella quale la pazienza e l'esperienza dell'operatore giocano un ruolo fondamentale, così come la qualità dei fotogrammi utilizzati (definizione, luminosità, punto di presa).

Le 3 fasi descritte sono stase compiute anche con i fotogrammi acquisiti con la videocamera Canon. In questo caso si è potuto usufruire di un numero maggiore di fotogrammi. Lo stesso punto viene riconosciuto in un numero maggiore di fotogrammi e questo migliora, generalmente, l'accuratezza della ricostruzione fotogrammetrica.

La (Figura 5.5) mostra la canaletta ricostruita con le videocamere e quella ricostruita con le immagini ottenute utilizzando la macchina fotografica Canon.

Fase 4: esportazione del modello tridimensionale

Mentre si effettua la referenziazione Australis mette a disposizione dell'utente una finestra, attivabile cliccando sulla casella *3D view*, dove vengono posizionati nello spazio i punti correttamente referenziati. La (Figura 5.3) rappresenta i punti riconosciuti a referenziazione completata per la canaletta ricostruita con le immagini dalle videocamere Basler, mentre in (Figura 5.4) la canaletta ricostruita con le immagini della macchina fotografica Canon.

Le coordinate tridimensionali (x, y, z) di ogni punto rappresentato vengono esportate in un file di formato *.txt* mediante il comando *3DList*.

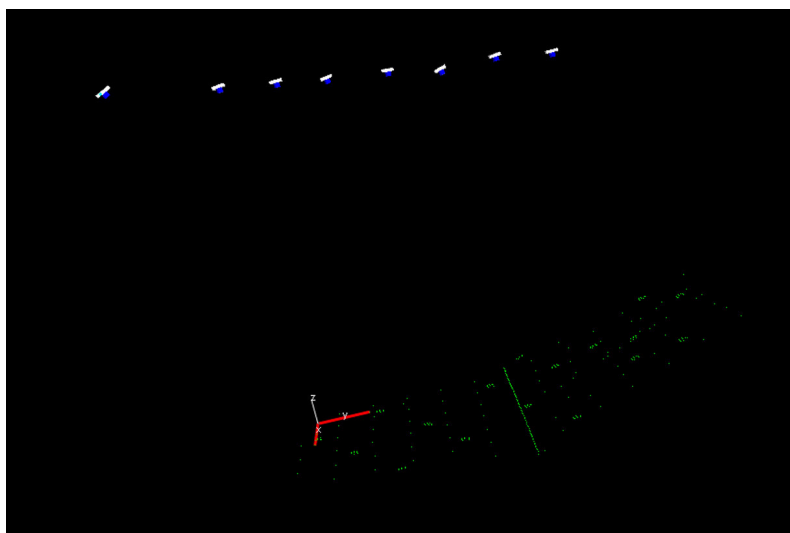


Figura 5.3: Punti referenziati dal software Australis, elaborando le immagini acquisite con la macchina fotografica Canon. Oltre ai punti si nota il sistema di riferimento (in rosso) e le varie posizioni spaziali da dove sono state scattate le foto.

Fase 5: elaborazioni in ArcGis

Sfruttando i tool di Arcgis è stata svolta la seguente attività:

- conversione del file *.txt* di Australis in un file *.shp* (operazione eseguita in ArcCatalog utilizzando la funzione *create feature class from XY table*);
- creazione del file *.tin* mediante la funzione *CreateTin* del tool *3D Analyst* di ArcScene;
- creazione del raster della canaletta mediante la funzione *Tin to Raster* del tool *3D Analyst*.

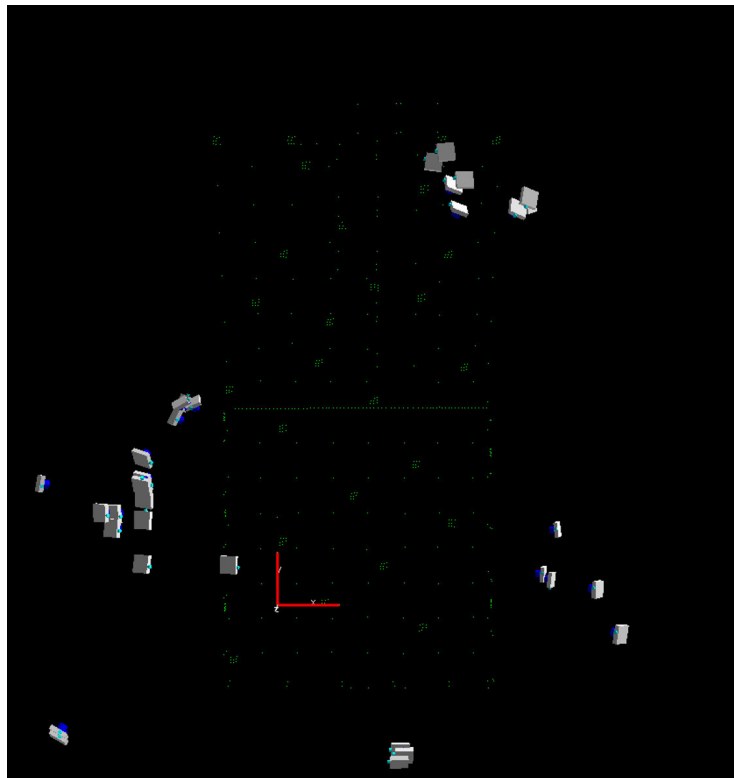


Figura 5.4: Punti referenziati dal software Australis, elaborando le immagini acquisite con la macchina fotografica Canon. Oltre ai punti si nota il sistema di riferimento (in rosso) e le varie posizioni spaziali da dove sono state scattate le foto.

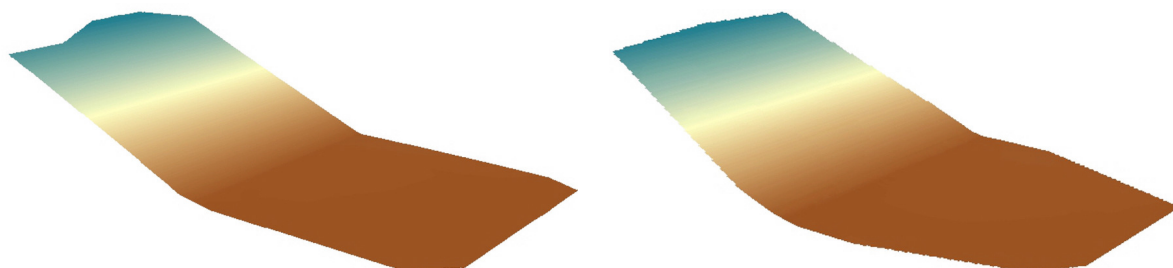


Figura 5.5: Nell'immagine a sinistra, il raster della canaletta ottenuto dall'elaborazione delle foto acquisite con la macchina fotografica Canon. A destra la canaletta ottenuta dall'elaborazione delle foto acquisite dalle videocamere Basler Ace GigE.

Canaletta con immagini da fotocamera Canon

L'uso della funzione *create Tin* non ha permesso di ottenere un risultato soddisfacente nella ricostruzione delle sponde della canaletta con le immagini da fotocamera Canon. Le ragioni sono, con ogni probabilità, legate al limitato numero di Control Points disposti nella zona di passaggio tra il piano di valle e la sponda ad esso normale e nella difficoltà del software nel riconoscere altri punti utili alla ricostruzione tridimensionale. Il tentativo di riprodurre le sponde era motivato sostanzialmente dalla esigenza di definire i limiti del software e da ragioni estetiche ed è stato sospeso.

5.5.2 Doppio piano inclinato con canale

Nelle prove eseguite in configurazione incanalata, sul piano di monte è stato realizzato un canale con pareti in plexiglas come descritto nel capitolo configurazione sperimentale . L'orientamento delle videocamere è stato leggermente modificato per inquadrare correttamente la zona di imbocco del canale a monte e l'area di arresto sul piano di valle. Le cinque fasi sopra descritte sono state applicate anche in questo caso.

Le pareti della canaletta sono state rilevate con la fotocamera Canon, per ottenere una migliore qualità delle immagini, e predisponendo lungo la faccia superiore delle stesse un elevato numero di Control Points, dopo la referenziazione dei punti il risultato è mostrato in (Figura 5.6)

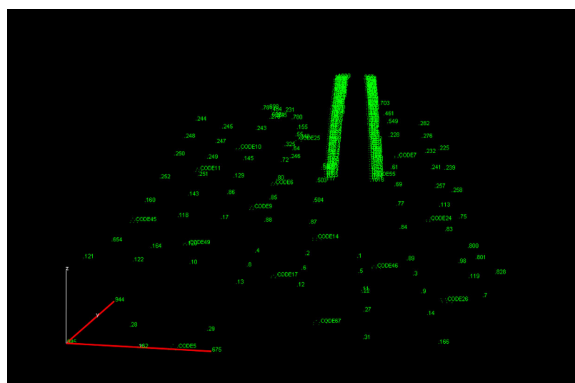


Figura 5.6: Referenziazione del bordo superiore del canale, in questa visualizzazione oltre al punto è evidenziato anche il codice identificativo.

La Fase 5 è stata integrata con una serie di operazioni eseguite per ottenere una ricostruzione adeguata dell'insieme piani di base e canaletta:

- sono stati realizzati due shape file diversi, uno per sponda;
- sono stati ottenuti due file .tin, uno per la sponda destra e un altro per la sponda sinistra;
- dai file .tin sono stati ottenuti due raster;
- tramite la funzione *mosaic* è stata fatta la composizione dei tre raster, quello della canaletta, quello della sponda destra e quello della sponda sinistra.

In (Figura 5.7) è mostrato il risultato ottenuto.

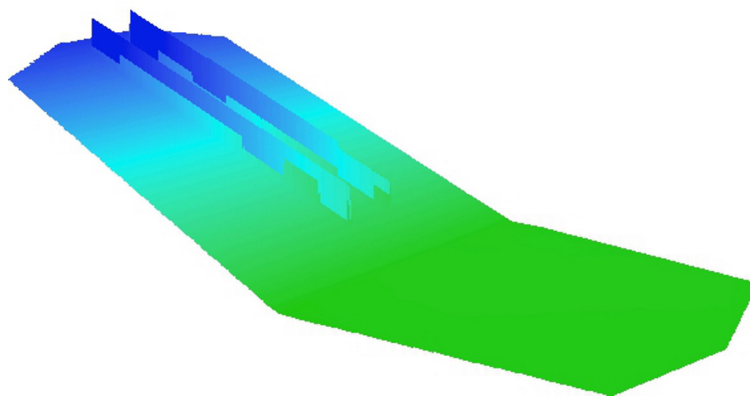


Figura 5.7: Raster del doppio piano inclinato con canale.

5.5.3 Doppio piano inclinato con canaletta e deviatore

Per collocare il deviatore all'interno del doppio piano inclinato con canaletta è stato realizzato un nuovo progetto in Australis con immagini ottenute dalla camera fotografica Canon, referenziando i punti di vertice del deviatore. Il sistema di riferimento adottato è lo stesso utilizzato in precedenza. In (Figura 5.8) è mostrato il risultato fotogrammetrico dell'inserimento.

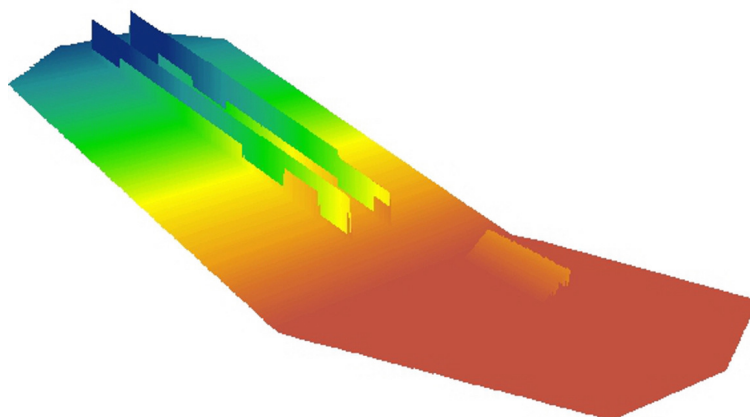


Figura 5.8: Raster del doppio piano inclinato con canale e deviatore.

Capitolo 6

I materiali impiegati nei test

6.1 Introduzione

I materiali granulari impiegati nei test sono tre: la Ghiaia Grossa, la Ghiaia Fine e le Zeoliti (Figura 6.1, Figura 6.2, Figura 6.3). La scelta dei materiali risponde ad esigenze di modellazione e di scala. Nella scelta dei materiali si è tenuto conto di alcuni parametri fisici che modificano la loro dinamica: la dimensione (tre diametri diversi) e il fattore di forma (ghiaia e zeoliti). Nell'ammasso costituito da zeoliti sono stati aggiunti, allo scopo di migliorare la restituzione fotogrammetrica, dei traccianti in PVC di colore bianco e diametro superiore.

In quanto segue vengono descritte le proprietà fisiche principali dei materiali utilizzati anche in relazione al loro utilizzo sulla canaletta sperimentale.



Figura 6.1: Ghiaia grossa.

6.1.1 Descrizione dei materiali

Il materiale granulare grossolano è costituito prevalentemente da materiale ghiaioso porfirico subangolare e da frammenti di natura mista. Il diametro medio è pari a 12mm , il fattore



Figura 6.2: Ghiaia fine.

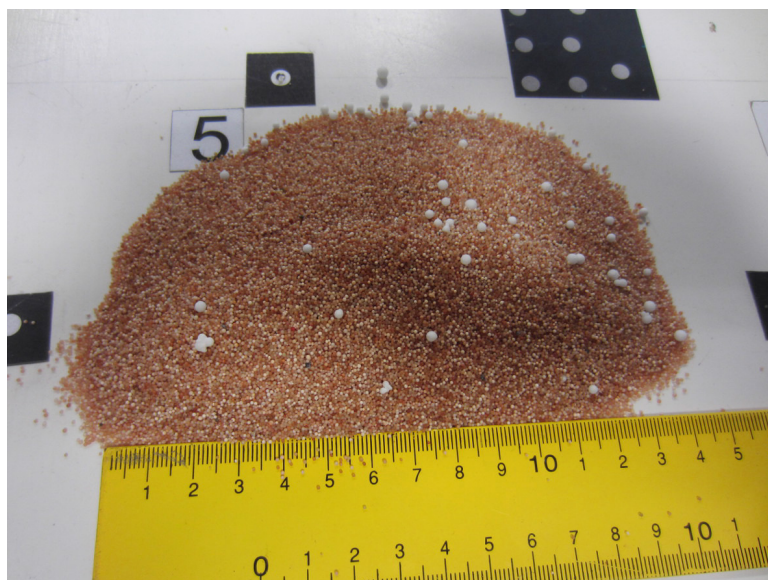


Figura 6.3: Le Zeoliti utilizzate nei test sperimentali e i traccianti di colore bianco in PVC.

di forma è pari a circa 0.7. La ghiaia fine ha le stesse caratteristiche litologiche, il diametro medio è di 5mm il fattore di forma è lo stesso della ghiaia grossa.

Le zeoliti utilizzate sono sintetiche, costituite da particelle granulari di resina anionica, hanno forma sferica, superficie liscia, diametro medio di 1.2mm e variabilità compresa tra i 0.2mm e 2mm .

Le zeoliti hanno una forma adatta alla simulazione di fenomeni come le valanghe granulari di neve densa (Figura 6.4). La ghiaia è più rappresentativa del materiale che forma le colate di detriti di tipo dolomitico.

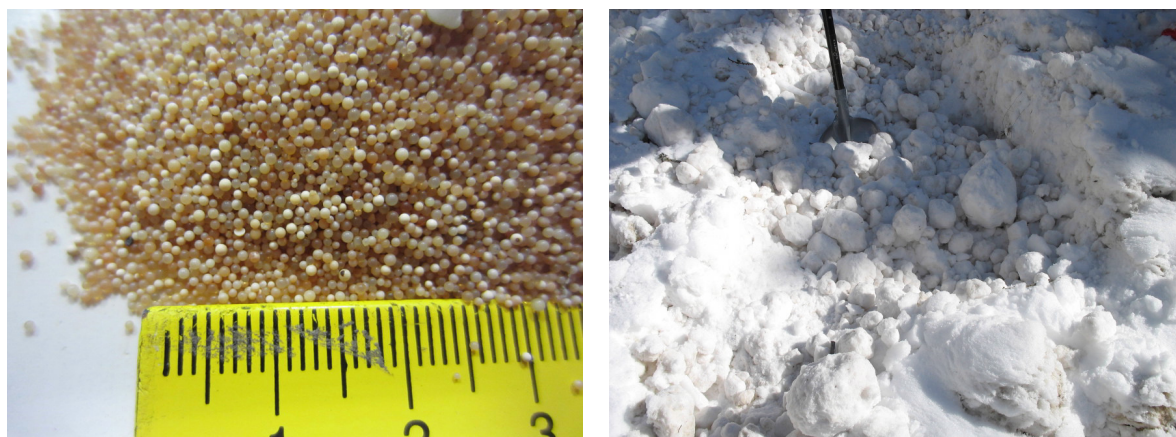


Figura 6.4: A sinistra, dettaglio sui grani che costituiscono il materiale zeolitico, A destra il deposito di una valanga di neve granulare.

6.2 Parametri fisici d'interesse

6.2.1 Densità

La densità dei clasti di ghiaia grossa e fine è stata determinata con il metodo volumetrico. La densità della zeolite è stata acquisita dalla letteratura.

6.2.2 Porosità

I risultati parziali ottenuti per il calcolo della densità sono stati sfruttati anche per stimare la porosità dei due ammassi ghiaiosi. Nel modo seguente:

- il secchio con la ghiaia e l'acqua è in condizioni di saturazione pertanto il volume d'acqua di 0.5l è stato considerato come volume dei vuoti
- Il volume totale ghiaia più acqua è noto
- la porosità è stata pertanto determinata con la consueta relazione, volume dei vuoti diviso volume totale.

La porosità delle zeoliti invece è stata determinata in questo modo: La densità è nota dalla letteratura, la massa è stata pesata in laboratorio, si è ricavato il volume della parte solida.

Conoscendo il volume totale sul cilindro, è stato possibile determinare il volume dei vuoti e conseguentemente la porosità.

6.2.3 Compattamento

È stata effettuata una analisi del compattamento che i vari materiali possono presentare. Questa proprietà è importante nella definizione delle condizioni in cui gli ammassi granulari vengono collocati sulla canaletta prima del loro rilascio.

La stima di questo parametro è stata svolta nel modo seguente (Figura 6.5):

- in un cilindro graduato è stata introdotta una definita quantità di materiale. La disposizione iniziale del materiale è stata definita attraverso il rovesciamento del cilindro contenitore, mantenuto chiuso all'estremità superiore, e il successivo riposizionamento con modalità mantenute costanti;
- il contenitore è stato vibrato manualmente fino alla condizione di massima compattazione (Figura 6.5).

L'operazione è stata eseguita più volte da diversi operatori ed ha fornito i risultati riportati in Tabella 6.1.



Figura 6.5: Cilindro graduato con ghiaia fine ,

Materiale	Densità (kg/m ³)	Porosità	Compattamento
Ghiaia Grossa	2569	51%	15%
Ghiaia Fine	2598	52%	13%
Zeoliti	1080	20%	5%

Tabella 6.1: La densità dei materiali utilizzati nelle prove sperimentali, la loro porosità, e il compattamento subito.

6.2.4 Determinazione dell'angolo d'attrito tra il materiale granulare ed il fondo della canaletta

L'angolo d'attrito tra i diversi materiali ed il fondo della canaletta è stato determinato sperimentalmente mediante l'utilizzo della scatola di taglio mostrata in Figura 6.6. La scatola è stata realizzata in modo da minimizzare l'attrito della stessa con il fondo, mediante l'utilizzo di quattro ruote ad attrito volvente praticamente nullo che mantengono le pareti della scatola sollevate dal fondo di circa 0.5mm .

La scatola viene collocata sul fondo orizzontale della canaletta. La forza che induce la tensione al taglio tra il materiale e il fondo è applicata come illustrato in Figura 6.6. L'aumento della forza, fino al raggiungimento della tensione limite, viene attuato versando del materiale granulare nel contenitore bianco, con modalità quasi statiche. Il deviatore di direzione della corda di trasmissione della forza è costituito da una carrucola ad attrito volvente trascurabile.

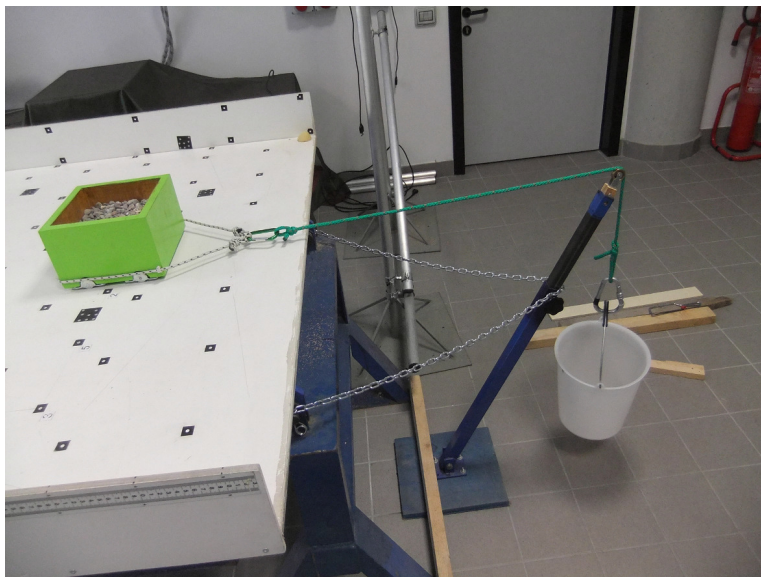


Figura 6.6: La scatola di taglio utilizzata per la misurazione dell'angolo d'attrito tra il materiale ed il fondo della canaletta.

Modalità di svolgimento dei test

Il materiale granulare viene posto all'interno della scatola con uno spessore di almeno 10 cm. Il carico complessivo, in direzione verticale, viene ottenuto semplicemente con il materiale granulare o con l'aggiunta di elementi dal peso noto come in Figura 6.7. Nel contenitore bianco viene inserito manualmente del materiale zeolitico che permette di far variare il carico con estrema gradualità. L'inserimento continua fino al raggiungimento delle condizioni limite di movimentazione della scatola.

L'osservazione sperimentale ha mostrato come uno spostamento iniziale potesse evolvere, nei pressi delle condizioni limite, in una accelerazione costante della scatola o in un successivo suo arresto. Nella prima situazione la condizione limite è ben definibile, nella seconda l'incertezza è maggiore e mette in evidenza come il materiale, riarrangiandosi all'interno

della scatola, possa presentare condizioni di attrito diverse. Tutti i movimenti della scatola di taglio sono stati registrati e i valori di attrito sono stati stimati attraverso un processo di media dei valori di tensione normale, σ , e tangenziale, τ , ottenuti.

Nella condizione limite la scatola compie un movimento nella direzione della forza applicata. Sono stati registrati tutti gli spostamenti percettibili ad occhio. In alcuni test la dinamica si risolve in un unico movimento in altri si sviluppa in più step.

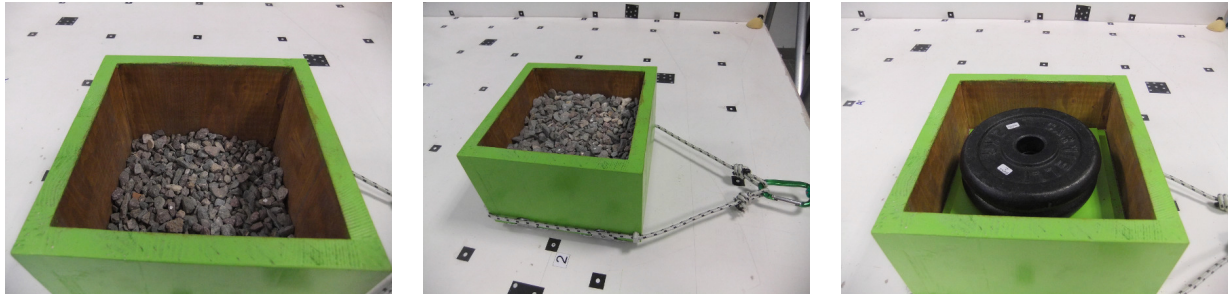


Figura 6.7: Il carico verticale all'interno della scatola di taglio è stato ottenuto sia modificando il peso di materiale granulare nella scatola, come nella figura a sinistra e nella figura in centro, sia utilizzando dei carichi noti, come nella figura a destra.

Risultati

I risultati ottenuti considerando solo il movimento finale sono i seguenti:(Figure 6.8, 6.9, 6.10)

I dati sono stati elaborati nell'ipotesi che il comportamento reologico del materiale sia di tipo Coulombiano.

Il valore dell'attrito di natural declivio, φ , per la ghiaia grossa è pari a 35° per il materiale zeolitico è pari a 28° [5]. Quest valori sono utili per comprendere alcuni aspetti della dinamica degli ammassi osservati nelle simulazioni di laboratorio.

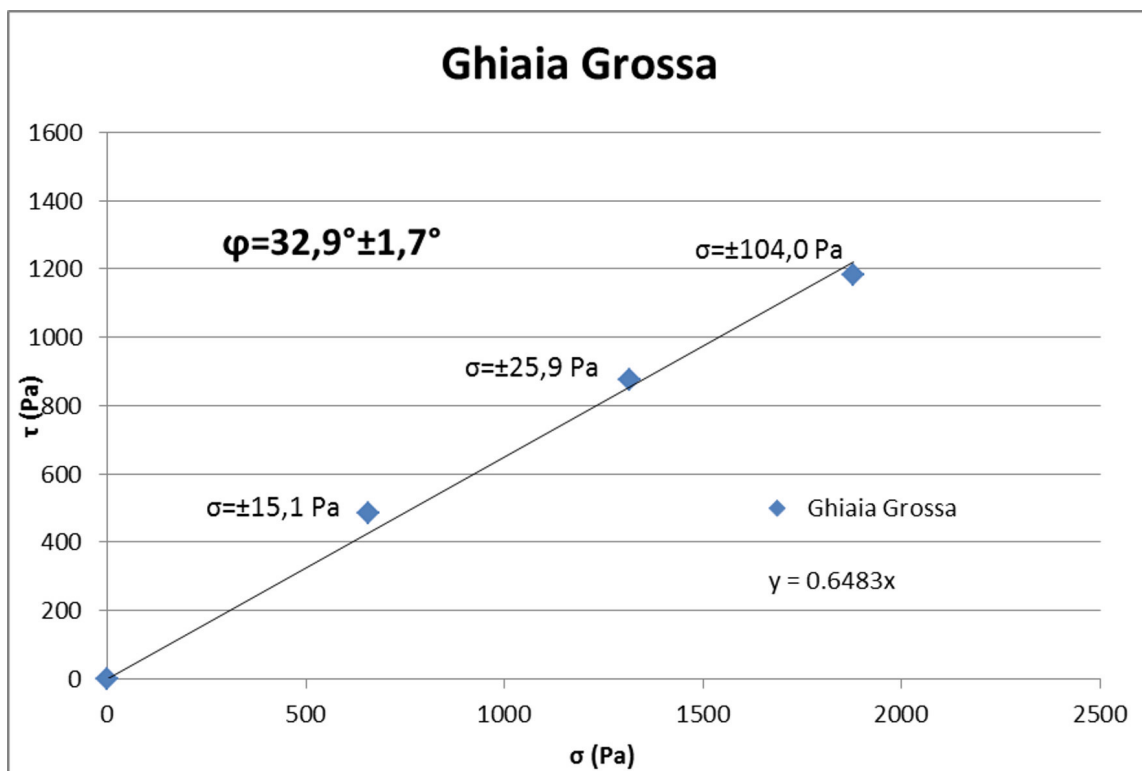


Figura 6.8: Grafico che riporta i risultati delle prove di attrito sul fondo per la ghiaia grossa con relativo errore associato ad ogni punto ed al valore dell'angolo d'attrito.

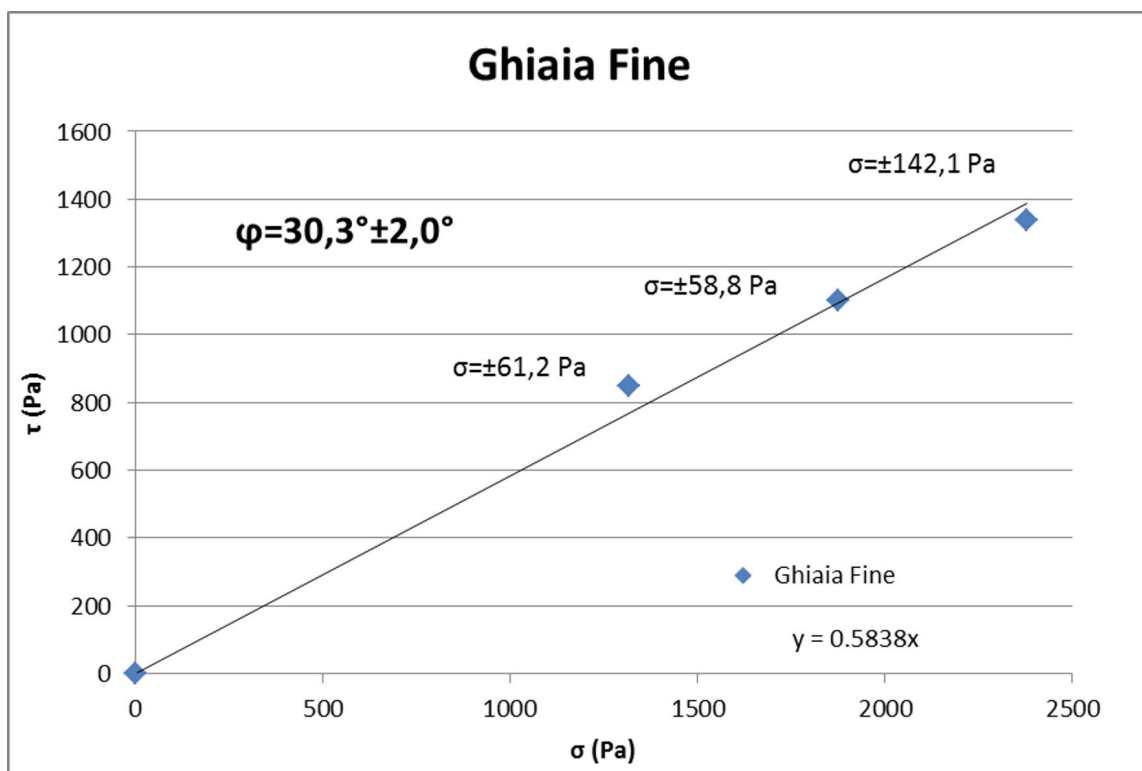


Figura 6.9: Grafico che riporta i risultati delle prove di attrito sul fondo per la ghiaia fine con relativo errore associato ad ogni punto ed al valore dell'angolo d'attrito.

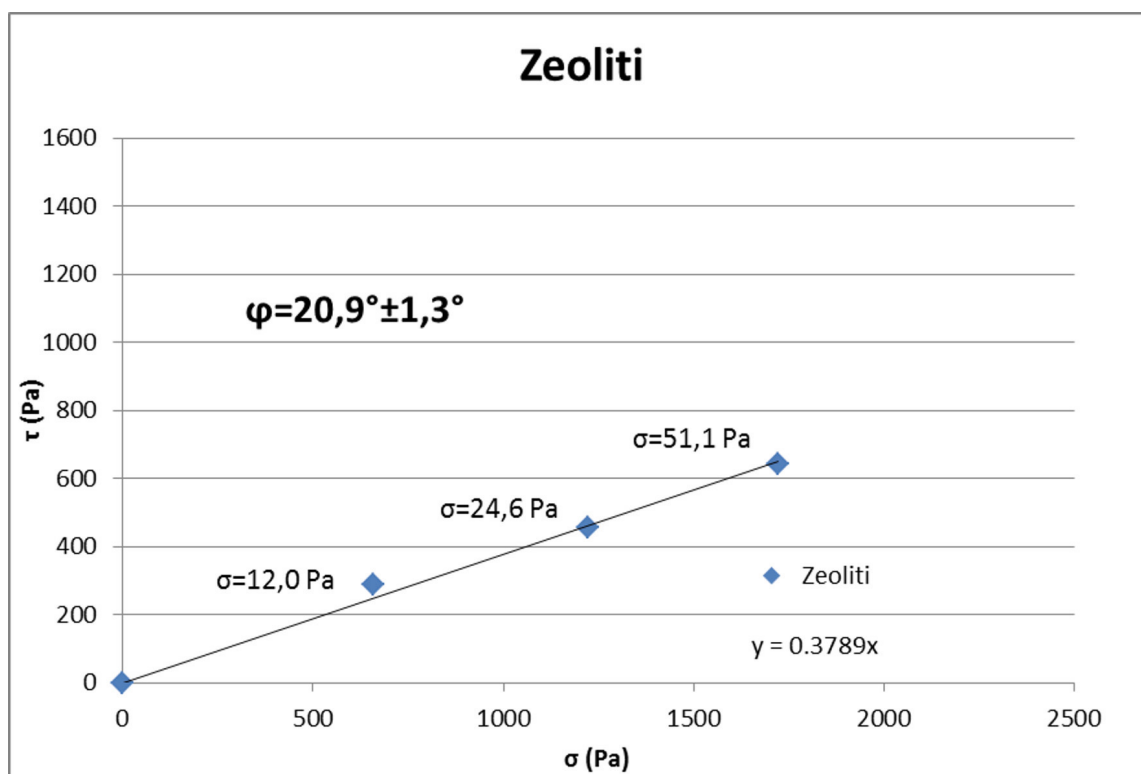


Figura 6.10: Grafico che riporta i risultati delle prove di attrito sul fondo per le zeoliti con relativo errore associato ad ogni punto ed al valore dell'angolo d'attrito.

Capitolo 7

Simulazioni

7.1 Introduzione

In questa sezione del lavoro sono riportate le simulazioni fatte con i tre materiali a disposizione nelle differenti configurazioni della canaletta, pendio libero, pendio incanalato e pendio incanalato con deviatore.

L'inclinazione del pendio di monte è stata mantenuta a 27.75° , del pendio di valle a 6.5° .

7.2 Prove su pendio aperto

7.2.1 Preparazione dei test

Da un punto di vista fotogrammetrico, sono state mantenute le condizioni già testate in fase di calibrazione e ricostruzione dei piani.

È stato effettuato un controllo funzionale delle componenti e della corretta posizione delle videocamere.

Il materiale è stato rilasciato sulla canaletta utilizzando un contenitore tronco-conico, collocato sempre nella stessa posizione sul piano di monte (Figura 7.1). Il peso del materiale da utilizzare è stato determinato riempiendo il volume del tronco-cono con modalità di caricamento mantenute costanti ($12.5kg$ di ghiaia grossa e ghiaia fine e $7.5kg$ di materiale zeolitico). Il rilascio del materiale sulla canaletta è stato attuato manualmente, in modo impulsivo.

7.2.2 Modalità di esecuzione dei test

Terminata la fase di caricamento, si è provveduto alla rapida messa a punto dei dispositivi dedicati alla ripresa.

Oltre al sistema di acquisizione fotogrammetrico, è stata utilizzata un'altra videocamera per la ripresa dell'evento da valle.

Avviato il sistema d'acquisizione e attivata la videocamera di valle, il tronco-cono viene rimosso con un rapido movimento, prima verticale e poi laterale. Il primo movimento tende a ridurre al minimo l'interferenza del contenitore sull'avvio del moto, il secondo a liberare il campo visivo delle videocamere. A seguito del completo arresto del materiale, l'acquisizione viene arrestata ed il deposito finale viene rilevato fotograficamente da diversi punti di vista.

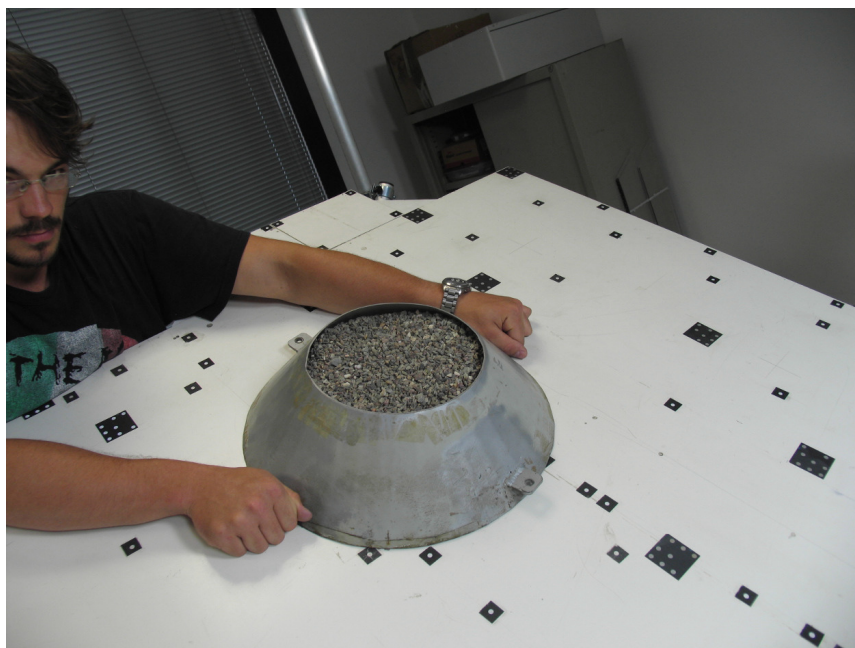


Figura 7.1: Il contenitore tronco-conico caricato con ghiaia grossa, posizionato sul piano di monte .

7.2.3 Considerazioni generali

Sono state eseguite diverse prove preliminari per testare la procedura descritta con esito positivo. Sono stati quindi eseguiti sei test, due per ciascun materiale. Il secondo test eseguito per ogni materiale è la ripetizione del primo allo scopo di verificare la ripetibilità delle prove, con riferimento soprattutto alla modalità di caricamento e rilascio del materiale granulare.

7.3 Prove su pendio incanalato

7.3.1 Preparazione dei test

Sistemato il canale, si è provveduto a caricare il materiale. Il peso di materiale utilizzato è lo stesso delle prove su pendio aperto.

Il materiale è stato posizionato con cura nell'apposito spazio delimitato dalle superfici laterali e dai setti trasversali. La forma attribuita al deposito iniziale è stata mantenuta costante (Figura 7.2, Figura 7.3).

L'angolo d'inclinazione del pelo libero è pari all'angolo di natural declivio del materiale.

Le dimensioni e gli angoli significativi del deposito sono stati misurati e il profilo dell'ammasso è stato tracciato sulle pareti permettendo di mantenere l'uniformità della forma iniziale per tutte le prove eseguite.

7.3.2 Modalità di esecuzione dei test

Rispetto a quanto descritto per i test su pendio aperto, in queste prove è stata aggiunta un'ulteriore videocamera (oltre a quella da valle) per la ripresa del lato destro del canale.

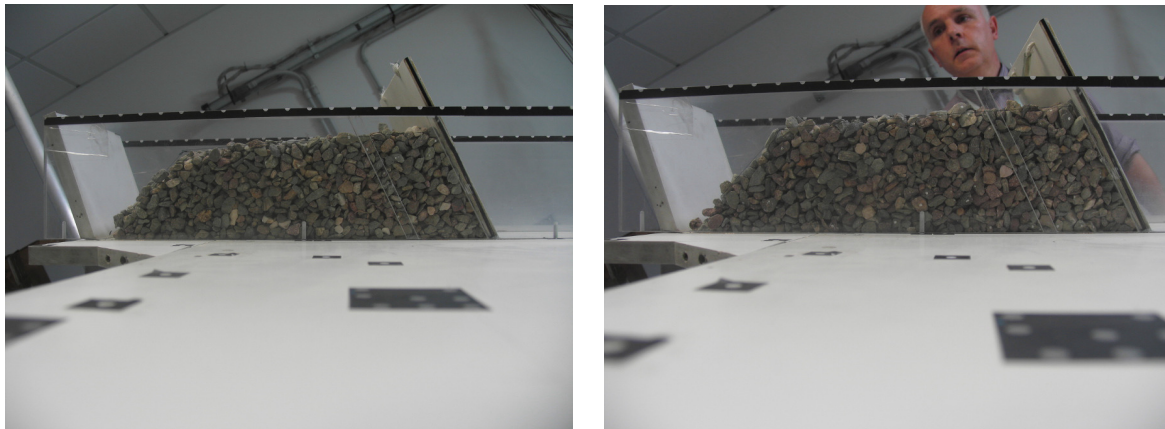


Figura 7.2: Il deposito iniziale della ghiaia grossa per la prima prova, a sinistra, e , a destra, il deposito in occasione della ripetizione della prova.

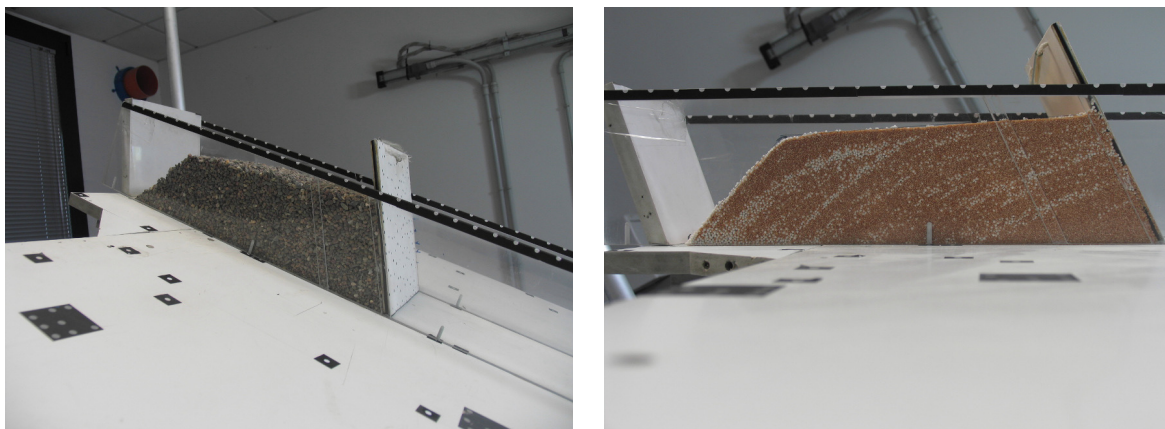


Figura 7.3: Modalità di caricamento della ghiaia fine e del materiale zeolitico nelle prove su pendio incanalato.

Il materiale viene rilasciato nella canaletta rimuovendo manualmente e impulsivamente la paratoia a valle che delimita il deposito iniziale.

7.4 Prove su pendio incanalato con deviatore

7.4.1 Preparazione dei test

Il deviatore di flusso è stato applicato sul piano di valle utilizzando un nastro biadesivo e sistemando, con un nastro adesivo trasparente, le irregolarità manifestate dalla superficie di appoggio, a causa della non perfetta planarità del piano di valle (Figura 7.29).

7.4.2 Modalità di esecuzione dei test

I test vengono eseguiti adottando le modalità descritte nel caso di pendio incanalato.

7.5 Elaborazioni fotogrammetriche

Per ogni prova si dispone di circa sessanta fotogrammi per videocamera: quindici fotogrammi al secondo moltiplicati per il tempo impiegato dall'ammasso granulare per fermarsi. L'analisi fotogrammetrica è stata eseguita per alcuni istanti ritenuti particolarmente significativi.

La selezione è stata condotta visionando i fotogrammi e ripercorrendo cronologicamente la loro successione. In Figura 7.4 sono rappresentati due istanti della evoluzione del materiale zeolitico nella prova su pendio incanalato con deviatore: a sinistra, l'istante in cui tutto il canale è occupato dal materiale; a destra, l'istante in cui il materiale impatta contro il deviatore di flusso.

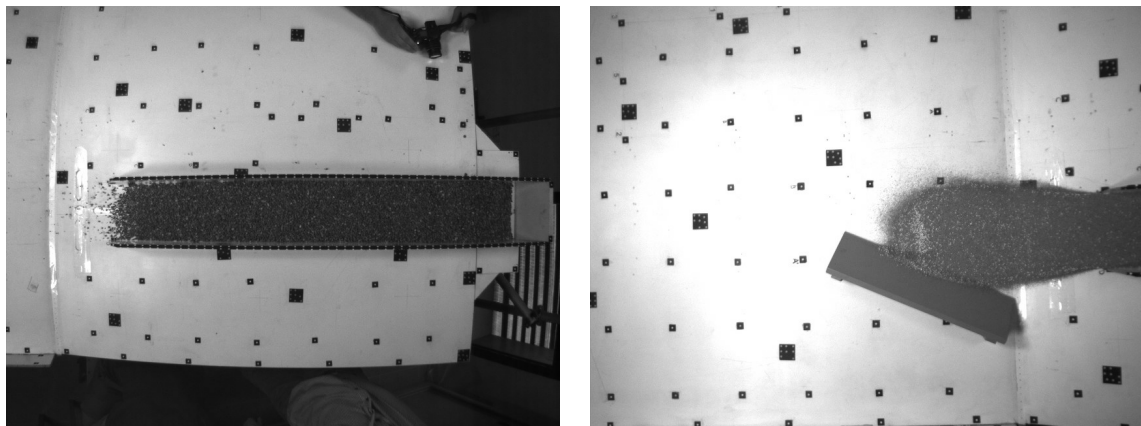


Figura 7.4: Due fotogrammi ritenuti significativi nella prova eseguita su pendio incanalato con deviatore di flusso: a sinistra, l'istante in cui il materiale occupa l'intero canale; a destra, l'istante in cui il materiale impatta contro il deviatore di flusso.

I fotogrammi delle otto videocamere, relativi allo stesso istante temporale, sono stati caricati nel software Agisoft Photoscan, per l'analisi fotogrammetrica.

Le operazioni condotte sono state le seguenti:

- Accedono al menu *Calibrazione* vengono associati ad ogni fotogramma i parametri di calibrazione della relativa videocamera;
- Vengono importate le coordinate dei marker ottenute dal Software Australis. Il posizionamento spetta all'utente, che deve considerare singolarmente ogni punto e assegnarlo alla sua posizione;
- Dopo aver posizionato i punti nei rispettivi target visibili (i punti corrispondenti ai target non visibili non vengono considerati) si avvia la funzione *Align photo*. Tramite questa operazione il software allinea i fotogrammi presenti nel progetto, sfruttando le corrispondenze tra i punti coordinati inseriti;
- Prima di procedere, è stato eseguito il mascheramento delle porzioni indesiderate dei fotogrammi, operazione molto importante ai fini grafici (Figura 7.20 e Figura 7.28);
- Viene avviata la funzione *Build Dense Cloude*. Con questa funzione il software individua un certo numero di punti sulla base dei contrasti di colore che riesce a cogliere. Questo sistema automatico è particolarmente efficiente e vengono individuati fino a più di 5000 punti;
- Viene avviata la funzione *Build Mesh*, funzione che collega i vari punti, creando una rete densa;
- Viene avviata la funzione *Build Texture* (Figura 7.5);
- Vengono esportati il dtm e l'ortofoto dell'ammasso.

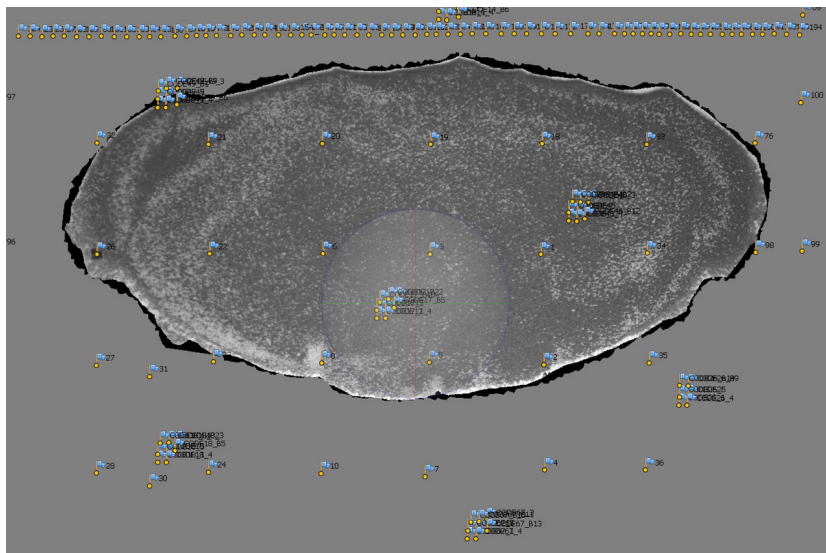


Figura 7.5: L'immagine è un esempio di ciò che si ottiene ultimata l'elaborazione fotogrammetrica. Si notano i punti coordinati (bandierine), importati da Australis, con il loro codice identificativo.

Con la procedura appena descritta si chiude la parte di elaborazione fotogrammetrica, condotta grazie all'utilizzo di due software: Australis e Photoscan. Il software Australis è stato utilizzato per definire la posizione dei marker e dei control point applicati sulla canaletta

nelle varie configurazioni. Le coordinate di ogni punto sono state espresse rispetto ad un comune sistema di riferimento, disegnato sulla canaletta reale. Il software Photoscan crea dei modelli 3D degli ammassi granulari ripresi mentre compiono la loro naturale evoluzione verso il pendio di valle.

La peculiarità di Photoscan sta nel riuscire a definire molto bene la superficie dei materiali granulari, grazie alla sua attitudine a riconoscere le irregolarità della luce riflessa dalle particelle costituenti l'ammasso. Australis non è in grado di svolgere un riconoscimento automatico così dettagliato, d'altro canto però è più affidabile nelle fasi fondamentali di referenziazione dei punti omologhi e di settaggio del sistema di riferimento.

7.5.1 Elaborazioni ArcGIS

In ArcGis è stata utilizzata la funzione *Mosaic to new Raster* presente nel tool *Data Management*. In questo modo è stato ottenuto un unico raster sovrapponendo al raster del doppio piano inclinato il raster del materiale granulare nei vari istanti temporali (Figura 7.20 e 7.28). Tra le elaborazioni possibili sui raster viene poi presentata l'evoluzione dei volumi occupati dall'ammasso in movimento, determinata utilizzando la funzione *Surface Volume* disponibile nell'estensione *3D Analyst tools*.

7.6 Osservazioni sulle prove effettuate

7.6.1 Prove su pendio aperto

Ghiaia grossa

Per quanto riguarda le simulazioni con ghiaia grossa si dispone in totale di cinque prove, l'analisi fotogrammetrica è stata eseguita per la quarta prova. Le prime due sono preliminari, svolte come già accennato, con l'obiettivo di testare l'apparato d'acquisizione e per correggere il posizionamento delle videocamere. Si tratta comunque di prove correttamente acquisite, e realizzate nelle medesime condizioni sperimentali.

Intanti iniziali In (Figura 7.6) viene messo in evidenza quanto accade negli istanti iniziali.

Appare evidente, in questa fase, l'effetto dovuto dal gradiente della superficie libera: l'ammasso si deforma tridimensionalmente, espandendosi sul piano di appoggio e contraendosi in direzione normale. Ciò è dovuto al rilassamento della forma iniziale in ragione al fatto che l'angolo imposto dal cono è superiore all'angolo di riposo del materiale. Dopo 0.80s circa termina l'espansione trasversale, i clasti scorrono verso valle risentendo dell'attrito sul fondo. Oltre il cambio di pendenza la forza resistente è nettamente superiore a quella mobilizzante e le particelle rallentano il loro moto.

Dalle prove d'attrito tra materiale granulare e fondo emerge che l'angolo d'attrito è di circa 30°, superiore quindi all'angolo di inclinazione del pendio. Conseguentemente in assenza di gradiente della superficie libera non si verificherebbe scorrimento sul piano di monte.

Osservando i quattro fotogrammi (Figura 7.6) si nota come manchi lo scivolamento in blocco dell'ammasso.

La mobilitazione è quindi una conseguenza del collassamento della forma tronco-conica iniziale.

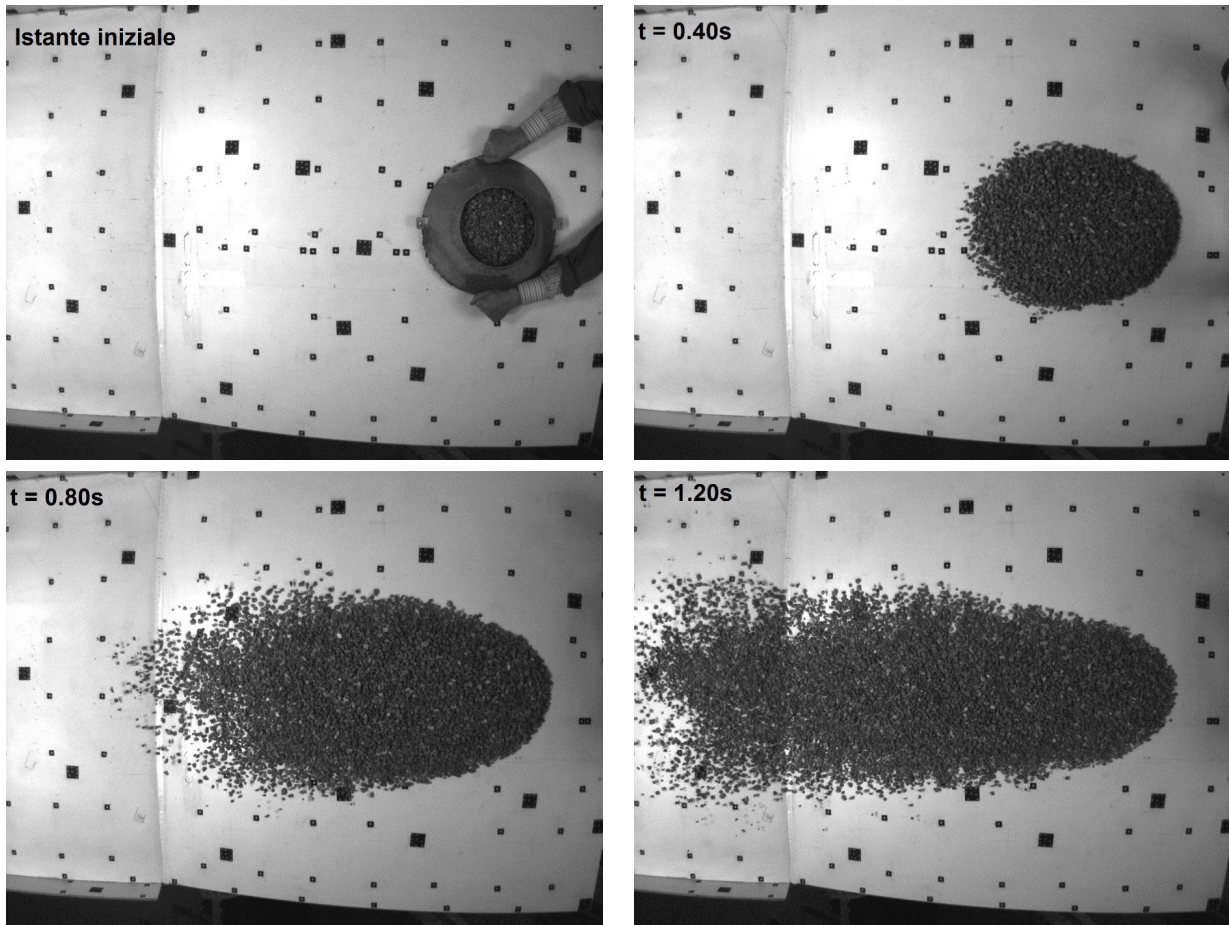


Figura 7.6: Fotogrammi ottenuti dalla videocamera Basler 1, focale 6 mm, durante la prova su pendio aperto con ghiaia grossa.

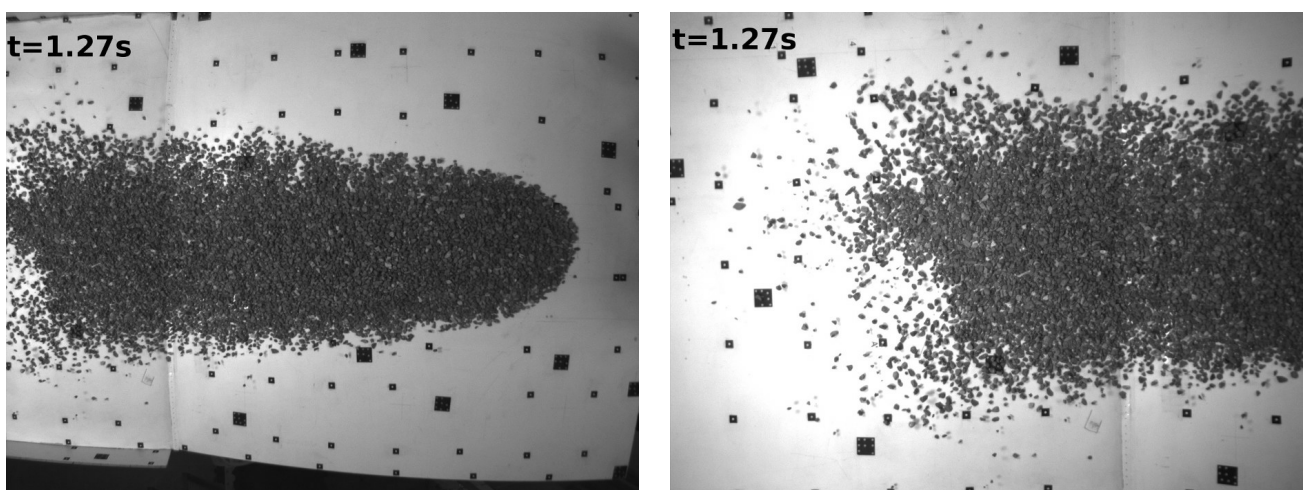


Figura 7.7: Il fotogramma a sinistra è stato ottenuto dalla videocamera Basler 1, focale 6mm, il fotogramma a destra dalla Basler 4, focale 8mm, durante la prova su pendio aperto con ghiaia grossa.

Fase intermedia Le due immagini colgono ciò che accade al superamento del cambio di pendenza, i primi clasti cominciano a fermarsi avviando quindi un processo di addensamento che si propaga verso monte. Nel frattempo nel piano di monte continua lo scorrimento del materiale. Si può notare come manchi ancora lo scorrimento al fondo delle particelle sommitali (figura 7.7).

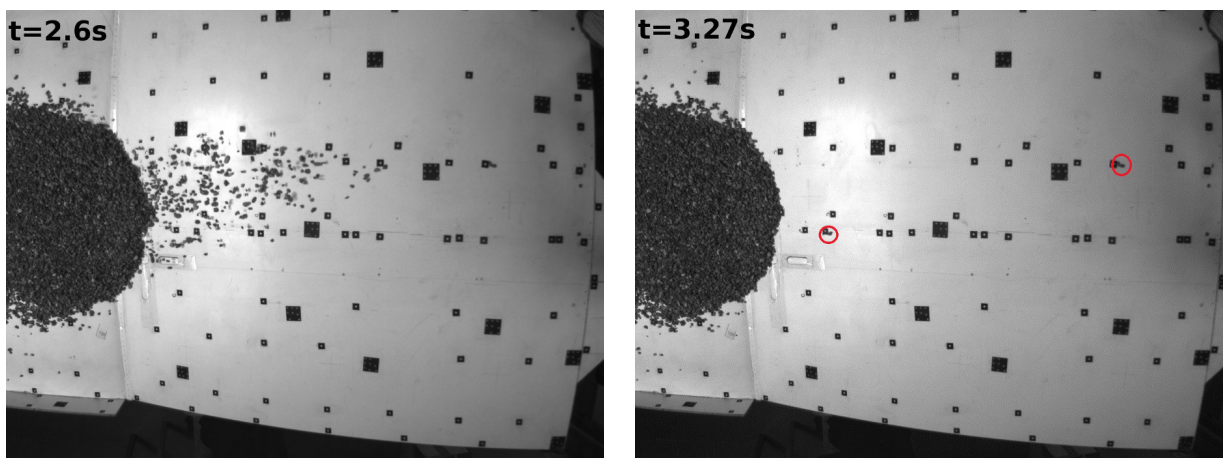


Figura 7.8: Fotogrammi ottenuti con la videocamera Basler1, focale 6mm. In rosso sono stati cerchiati i clasti rimasti nel pendio di monte

Fase Conclusiva Gli ultimi clasti raggiungono il deposito. La prova ha avuto una durata complessivo di 3.27s. Alcuni clasti (cerchiati in rosso) rimangono bloccati nel pendio di monte, risentendo del maggiore attrito locale indotto dalla presenza dei control points.



Figura 7.9: A sinistra il deposito finale fotografato con la videocamera Canon PowerShot Pro1. Il rettangolo rosso tracciato sopra il deposito delimita l'immagine di dettaglio a destra.

Deposito Finale Una conseguenza dell'addensamento dei clasti è visibile nell'ingradimento a destra di Figura 7.9. Nella zona centrale dell'ammasso i clasti si sono disposti con il lato minore nella direzione longitudinale a causa, probabilmente, della compressione subita dall'ammasso.

Evoluzione del volume nel tempo In Figura 7.10 è riportata l'evoluzione del volume occupato dall'ammasso durante il suo movimento verso valle. Il valore in rosso presenta un errore superiore a quello ottenuto dalla media tra gli altri valori.

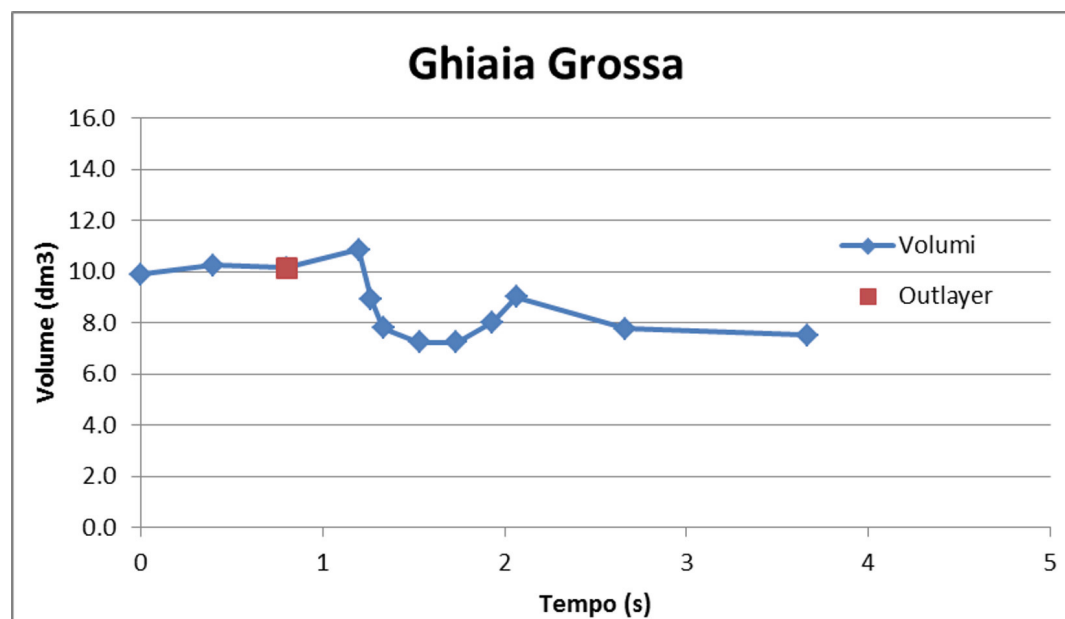


Figura 7.10: Evoluzione temporale del volume occupato dall'ammasso negli istanti elaborati fotogrammetricamente, nella prova su pendio aperto con ghiaia grossa. L'errore medio stimato su base fotogrammetrica è pari a $0.31dm^3$. Per il valore rappresentato dal punto rosso l'errore è significativamente maggiore di quello medio.

Ad una fase iniziale durante la quale il volume tende ad aumentare leggermente segue una fase intermedia di addensamento. Il successivo incremento, che culmina all'istante 2.07s, conduce ad un volume finale di poco inferiore.

Il dtm fotogrammetrico da cui è stato calcolato il volume per l'istante a 2.07s è stato riportato (Figura 7.11).

La cellsize del dtm è di 1cm, il volume è calcolato moltiplicando la base della cella, $1cm^2$, per l'altezza dell'ammasso corrispondente al punto pivotale, in questo modo il volume considerato è equivalente a quello di un parallelepipedo che ha per base la cella del dtm e per altezza la quota dell'ammasso (rispetto alla superficie della canaletta). Questa approssimazione diventa significativa quando sono presenti particelle isolate come negli istanti a 1.2s e 2.07s.

Confronto tra le prove eseguite nella attuale configurazione L'analisi presentata fa riferimento ad una delle cinque prove, quella ufficiale di qui è stata fatta l'analisi fotogrammetrica (prova quattro).

Per entrambe le prove preliminari (le prime due effettuate) l'evoluzione generale dell'ammasso segue la dinamica descritta. Si coglie però una differenza tra la prima e la seconda prova. Concentrandosi sulla posizione del deposito finale si nota come il secondo deposito si sia fermato leggermente più a monte del primo (qualche cm) e come la seconda simulazione sia leggermente più lenta della prima.

A qualche giorno di distanza, sono state realizzate le prove ufficiali, la quarta e la quinta, effettuate nelle stesse condizioni sperimentali di prova uno e prova due. Il deposito finale è mostrato in Figura 7.12. La forma del deposito appare molto simile. Il deposito della prova

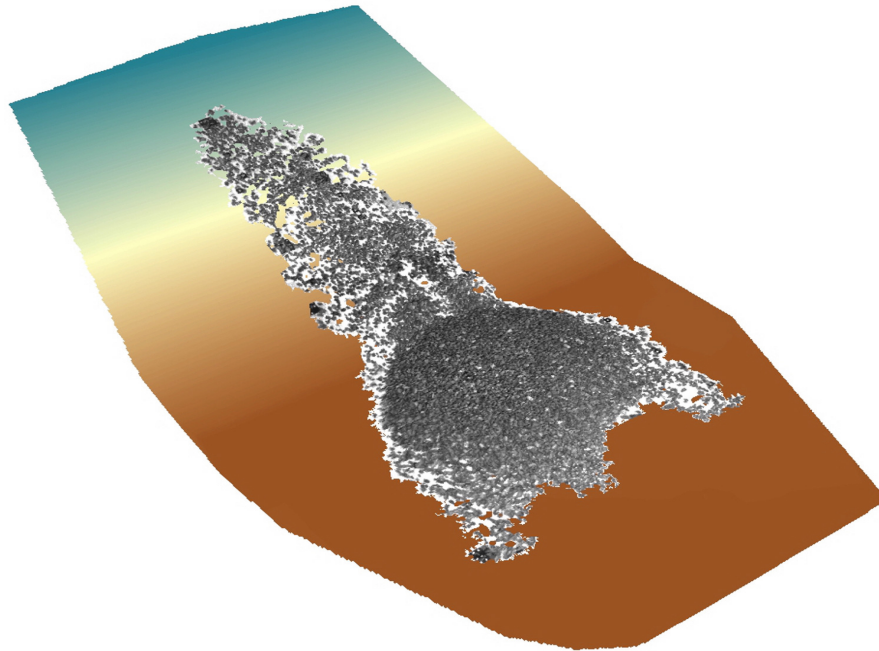


Figura 7.11: DTM dell'ammasso sovrapposto al DTM della canaletta nell'istante temporale $t = 2.07s$, per la prova su pendio aperto con ghiaia grossa.

ripetuta si estende leggermente più a monte del deposito della prima prova. La leggera differenza tra i due test dipende, probabilmente, da una non completa ripetibilità delle modalità di esecuzione dei test. Un altro effetto che deve essere tenuto in considerazione è l'effetto abrasivo del materiale sul fondo e la conseguente tendenza all'aumento della scabrezza tra metriale e fondo.

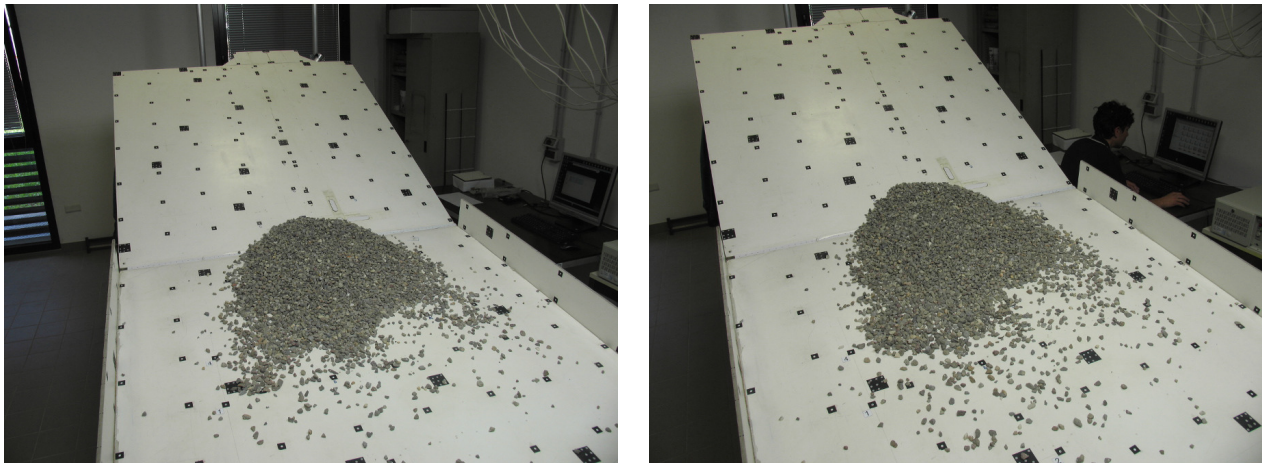


Figura 7.12: Confronto tra le due prove ufficiali nel caso di pendio aperto con ghiaia grossa. Si nota come nella prova ripetuta (a destra) l'ammasso si sia depositato leggermente più a monte.

La terza prova La terza prova merita un'analisi dedicata. In questo caso nell'ammasso costituito da ghiaia grossa è stata introdotta una quantità in peso trascurabile, dell'ordine dello 0.1%, di materiale zeolitico. In Figura 7.13 è riportato un fotogramma del deposito finale.

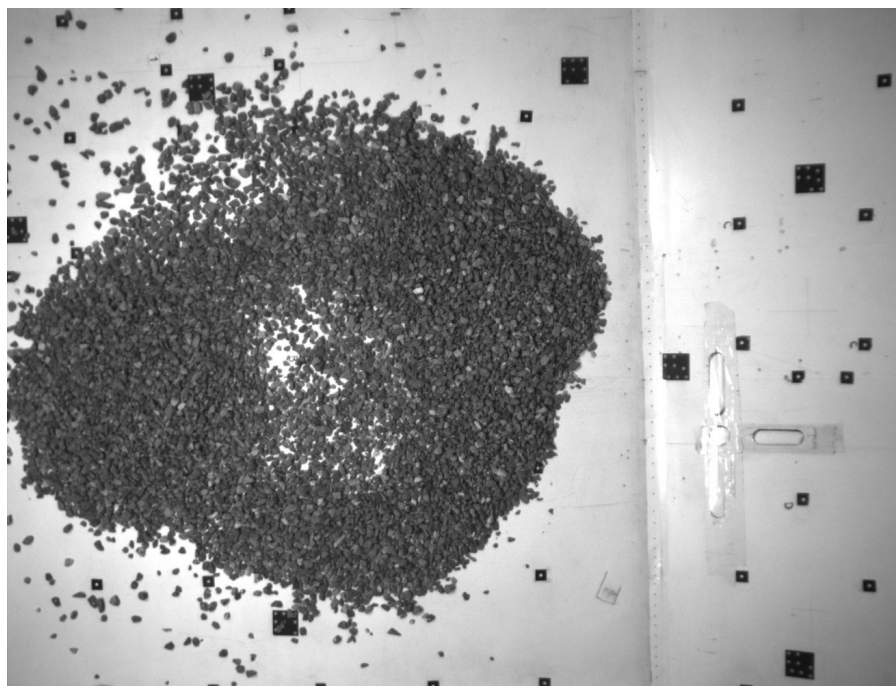


Figura 7.13: Il deposito finale ottenuto dal test svolto con una piccola quantità di zeoliti all'interno dell'ammasso costituito da ghiaia grossa su pendio aperto.

Il deposito finale si presenta con una forma completamente diversa rispetto a quella acquisita nelle altre prove, a testimonianza della sensibilità di questi fenomeni dalle condizioni iniziali.

Ghiaia fine

La ghiaia fine si comporta, da un punto di vista dinamico, come la ghiaia grossa. Ciò che varia è il diametro delle particelle, il numero, la massa delle singole particelle, non la massa totale del deposito che rimane di 12.5kg .

Il durata della prova è di 4.6s , superiore quindi alla durata della prova con ghiaia grossa.

L'andamento dei volumi è più complesso da interpretare, rispetto al caso precedente. Si verifica, come nel caso precedente, un compattamento finale dell'ammasso, anche se meno rilevante rispetto al caso con ghiaia grossa.

Il valore di volume minimo, pari a 6.37dm^3 , è inferiore del 35.6% rispetto al volume iniziale. Questo valore non rientra nel campo di variabilità del compattamento ottenuto dalle prove di compattamento ed è, con ogni probabilità, causato da una restituzione fotogrammetrica non adeguata.

Zeoliti

Con il materiale granulare zeolitico sono state realizzate tre prove. Per la seconda è stata eseguita l'analisi fotogrammetrica.

Si possono notare importanti analogie e differenze rispetto al caso della ghiaia grossa (Figura 7.6 e Figura 7.15).

Dalle immagini appare evidente l'effetto di rilassamento della forma tronco-conica iniziale e più apprezzabile il contemporaneo scivolamento di tutto l'ammasso, dovuto ad angoli d'attrito tra il materiale ed il fondo inferiori rispetto alla inclinazione del piano di monte.

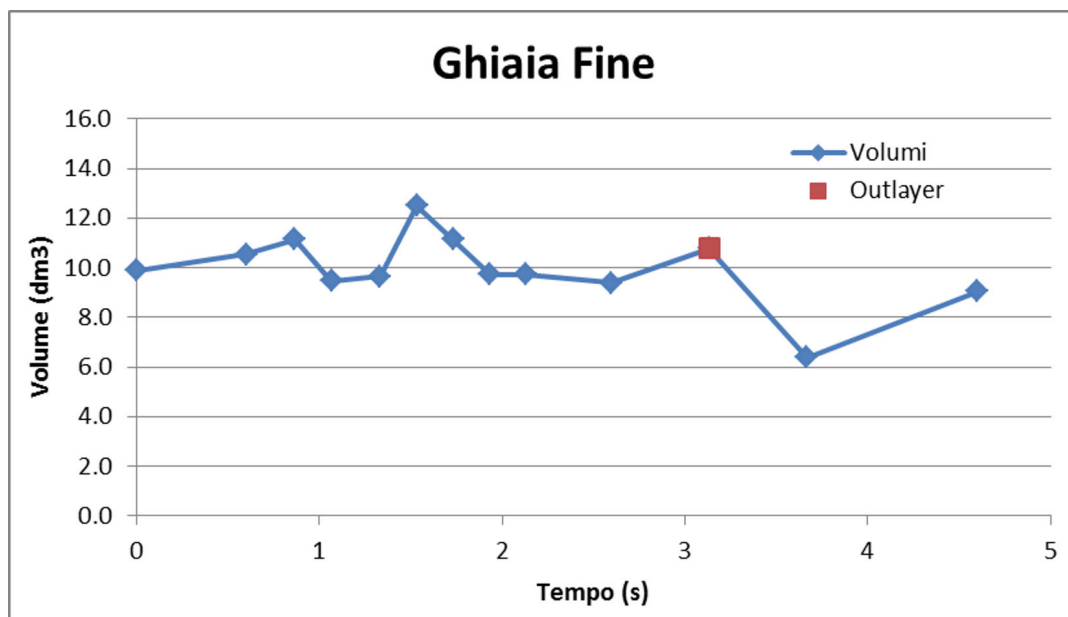


Figura 7.14: Evoluzione temporale del volume occupato dall'ammasso negli istanti elaborati fotogrammetricamente, nella prova su pendio aperto con ghiaia fine. L'errore medio stimato su base fotogrammetrica è pari a $0.26dm^3$. Per il valore rappresentato dal punto rosso l'errore è significativamente maggiore di quello medio.

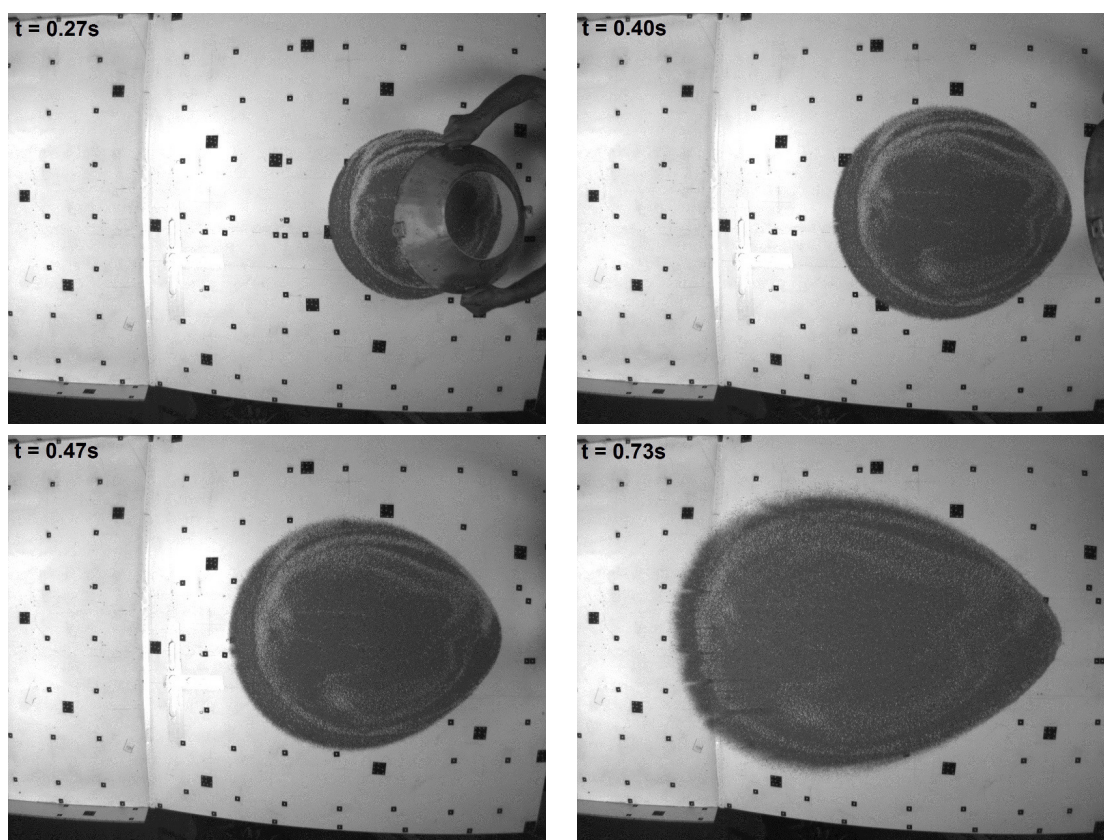


Figura 7.15: Istanti iniziali della evoluzione del materiale zeolitico su pendio aperto. I fotogrammi sono stati ripresi dalla videocamera Basler 1, focale 6mm.

La fase intermedia, è concentrata in tempi più brevi. Dalle prove di compattamento risulta che la riduzione di volume possibile per le zeoliti è sensibilmente inferiore, quindi alla compressione che si ha nel piano di valle le particelle rispondono per quanto possibile addensandosi e poi propagandosi arealmente. Il risultato è un deposito finale spalmato su quasi tutta la larghezza della canaletta (Figura 7.16).

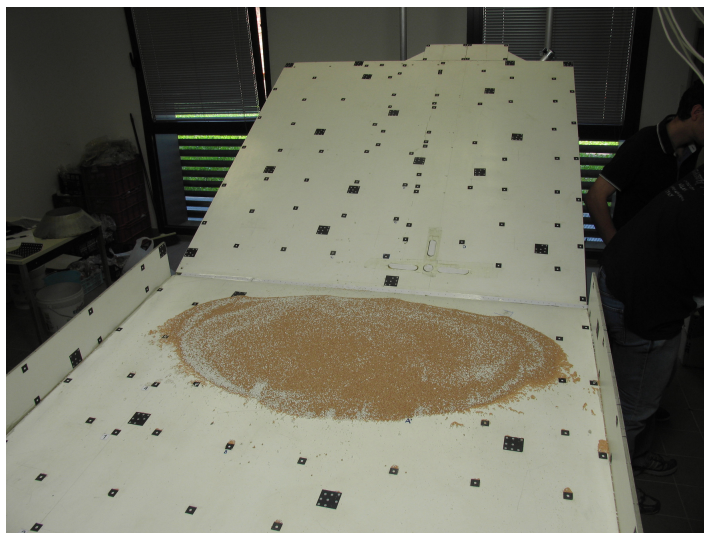


Figura 7.16: Posizione e morfologia del deposito dell'ammasso zeolitico nelle prove su pendio aperto.

Deposito Finale La Figura 7.16 mostra un deposito finale simmetrico. La simmetria è testimoniata dalla forma e dall'andamento dei traccianti bianchi in PVC.

I traccianti (particelle sferiche di PVC di diametro 2 mm, con densità circa 1.3 volte la densità della zeolite) si dispongono sulla superficie del deposito, secondo un processo osservato spesso anche sul campo, di gradazione inversa, malgrado il maggiore peso specifico.

I traccianti si dispongono in fasce concentriche e si addensano in punti particolari del deposito. La distribuzione a fasce dipende, probabilmente, dalla configurazione iniziale della miscela. Nella fase di generazione del deposito iniziale si verificano già effetti di segregazione granulometrica che stratificano il materiale fin dall'inizio.

La concentrazione in punti particolari è una conseguenza delle perturbazioni introdotte dalle irregolarità della superficie di scorrimento (ne sono distinguibili quattro in Figura 7.15, all'istante $t = 0.73s$, sul fronte dell'ammasso).

Perturbazioni nella distribuzione dell'ammasso sono visibili, per le stesse ragioni, anche in coda al deposito.

Evoluzione del volume nel tempo

In Figura 7.17 è descritta l'evoluzione del volume occupato dall'ammasso zeolitico nel tempo. Nella prova con zeoliti appare molto ridotto il comportamento a particella isolata che era significativo nelle prove precedenti. L'andamento non è dissimile da quanto osservato in precedenza e presenta, anche in questo caso un finale effetto di compattazione.

Il picco positivo del volume corrisponde temporalmente all'istante in cui l'ammasso zeolitico ha la massima estensione spaziale. Il valore è di $14.59m^3$, equivalente a un aumento percentuale del 32% rispetto al valore iniziale.

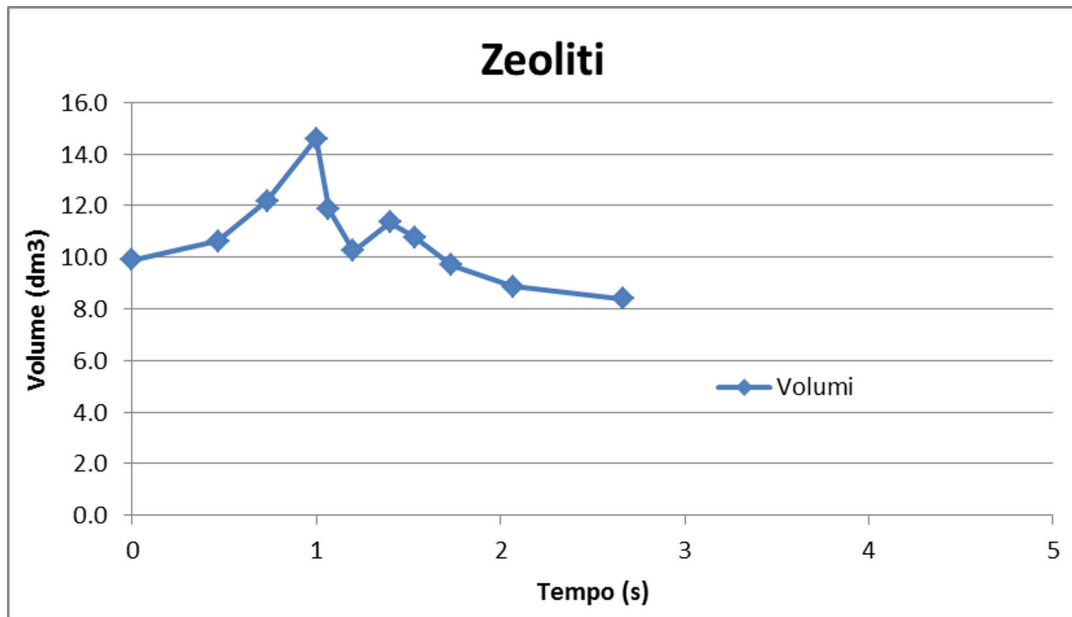


Figura 7.17: Evoluzione temporale del volume occupato dall'ammasso negli istanti elaborati fotogrammetricamente, nella prova su pendio aperto con zeoliti. L'errore medio stimato su base fotogrammetrica è pari a $0.32dm^3$.

Confronti tra le prove Le prove propongono un'evoluzione del tutto analoga, i depositi finali non presentano differenze degne di nota. Non si registra l'effetto di traslazione verso monte per le prove ripetute osservato in precedenza.

L'andamento del bordo e la concentrazione delle particelle in PVC si ripropongono nelle stesse aree, testimoniando la ripetibilità della fase di formazione iniziale dell'ammasso (Figura 7.16) .

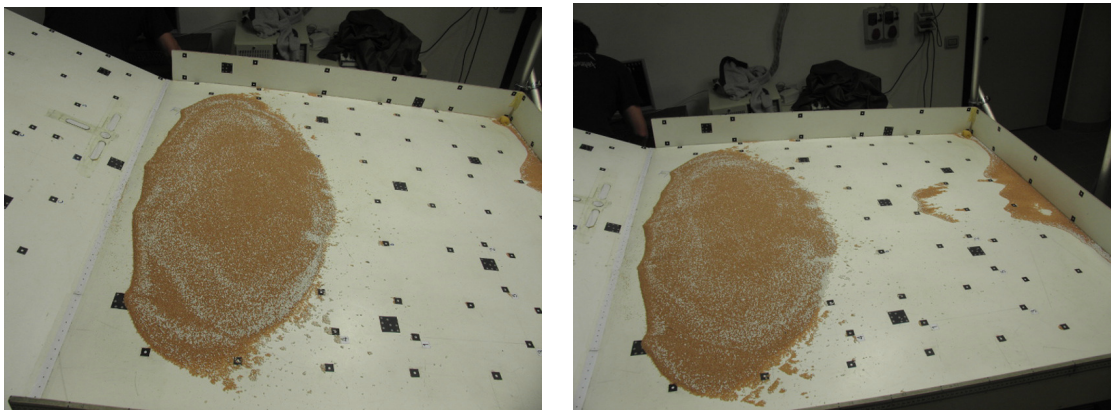


Figura 7.18: Immagini dei depositi finali della prova eseguita su pendio aperto con zeoliti e della sua ripetuta.

7.6.2 Prove su pendio incanalato

Ghiaia grossa

Dinamica dell'evento Osservando i fotogrammi relativi agli istanti iniziali (Figura 7.20), si nota come il materiale si distenda lungo tutto il canale. Questa prima osservazione di-

mostra come anche in questo caso il moto sia governato dalla componente gravitazionale indotta dal gradiente della superficie libera.

Ripercorrendo cronologicamente la successione dei fotogrammi si nota come il fronte in avanzamento aumenti progressivamente la sua velocità. La velocità media di percorrenza del canale è di $1.2m/s$. La velocità d'uscita dal canale è stimabile in $3m/s$. Al passaggio del corpo principale si verifica una differenza di velocità tra la parte centrale e i bordi dovuta all'effetto frenante delle pareti laterali del canale.

Dall'osservazione laterale del deposito (videocamera trasversale) si nota come l'ammasso si metta in moto dall'alto verso il basso (Figura 7.19). Il tempo impiegato per abbandonare completamente la posizione iniziale è di circa $4s$

Dopo $1s$ il fronte dell'ammasso raggiunge il pendio di valle. L'ammasso mantiene, inizialmente, la forma geometrica data dal canale. Successivamente il fronte rallenta, il materiale retrostante inizia ad esercitare una pressione sulle prime particelle depositate. Le particelle si addensano, il deposito conserva per brevi istanti la larghezza del canale poi inizia ad espandersi lateralmente fino ad assumere la forma finale.

Mentre il deposito finale va definendosi le ultime particelle percorrono il canale senza poterne uscire perché, nel frattempo, la propagazione verso monte del deposito raggiunge la zona di uscita dal canale, ostruendo il passaggio.

I dtm ottenuti permettono di dare una visione complessiva che aiuta a comprendere l'evoluzione del moto (Figura 7.20)



Figura 7.19: Le immagini sono state estratte dal video trasversale con ottica parallela al piano di monte, considerando la forma iniziale dell'ammasso si nota come i primi clasti ha mettersi in moto siano quelli adiacenti alla paratoia mobile e posti in superficie. Questo accade perchè in quella zona, alla rimozione della paratoia, si ha il massimo gradiente sulla superficie libera. Dopo, circa $1s$, la situazione è quella nell'immagine a destra, il profilo dell'ammasso tende a disporsi parallelamente all'inclinazione del pendio mentre sul fondo le particelle rimangono sostanzialmente immobili.

Deposito finale Il deposito appare allungato nella direzione del moto, l'ammasso si sviluppa su un unico lobo centrale ad esclusione di due piccole terminazioni laterali simmetriche. La parte centrale termina verso valle con una forma a punta, la punta risulta essere (con buona approssimazione) allineata con il centro del canale. Questo risultato morfologico è coerente con l'ipotesi di maggior velocità delle particelle nella zona centrale (Figura 7.21)

Confronto tra le prove eseguite nella attuale configurazione In questa configurazione sono state eseguite due prove. Il confronto tra i depositi finali (figura 7.21) mostra

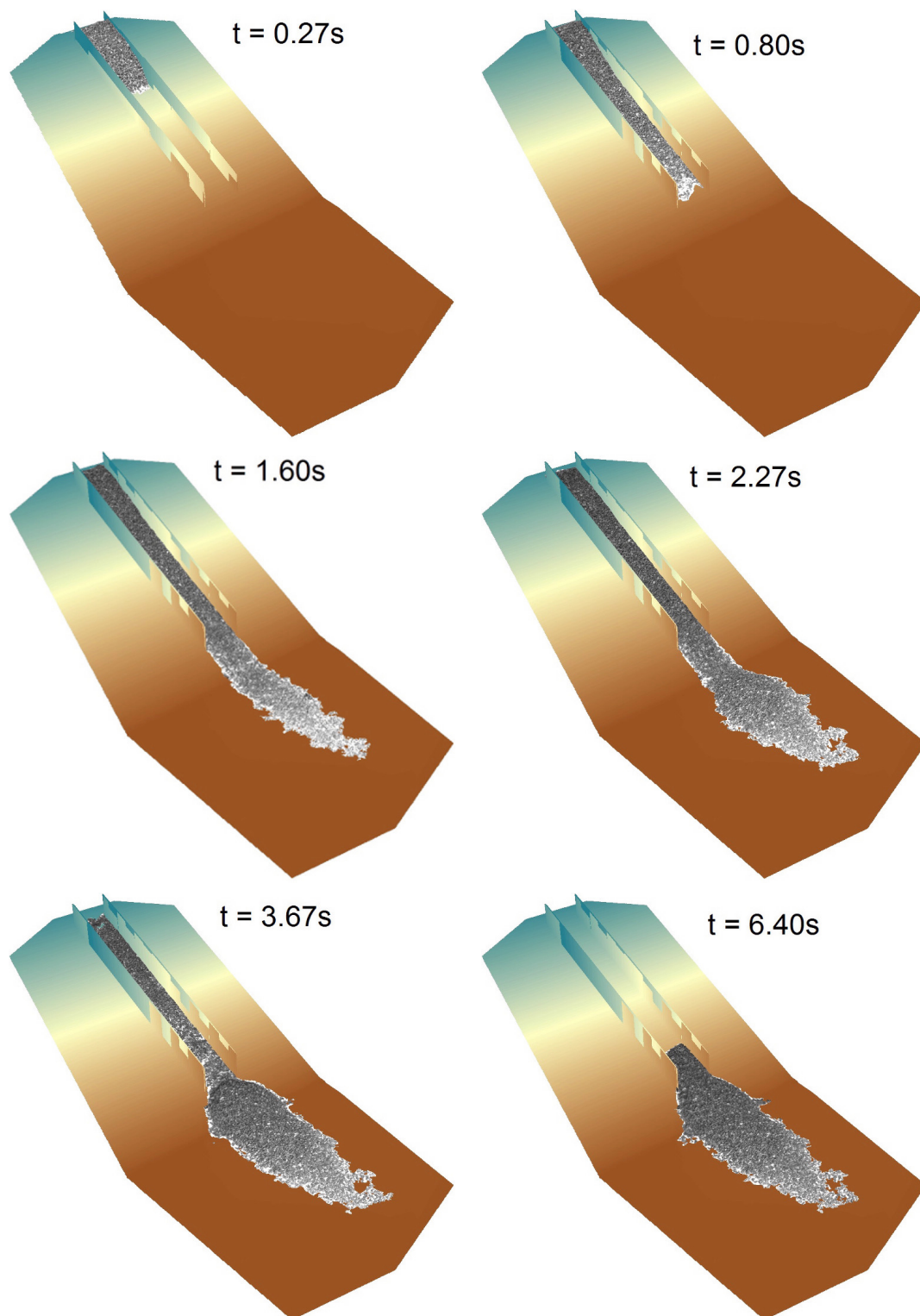


Figura 7.20: Alcuni istanti elaborati fotogrammetricamente dell'evoluzione temporale della ghiaia grossa su pendio incanalato.

delle differenze riconducibili alle osservazioni già fatte nel caso di scorrimento su pendio aperto dello stesso materiale.

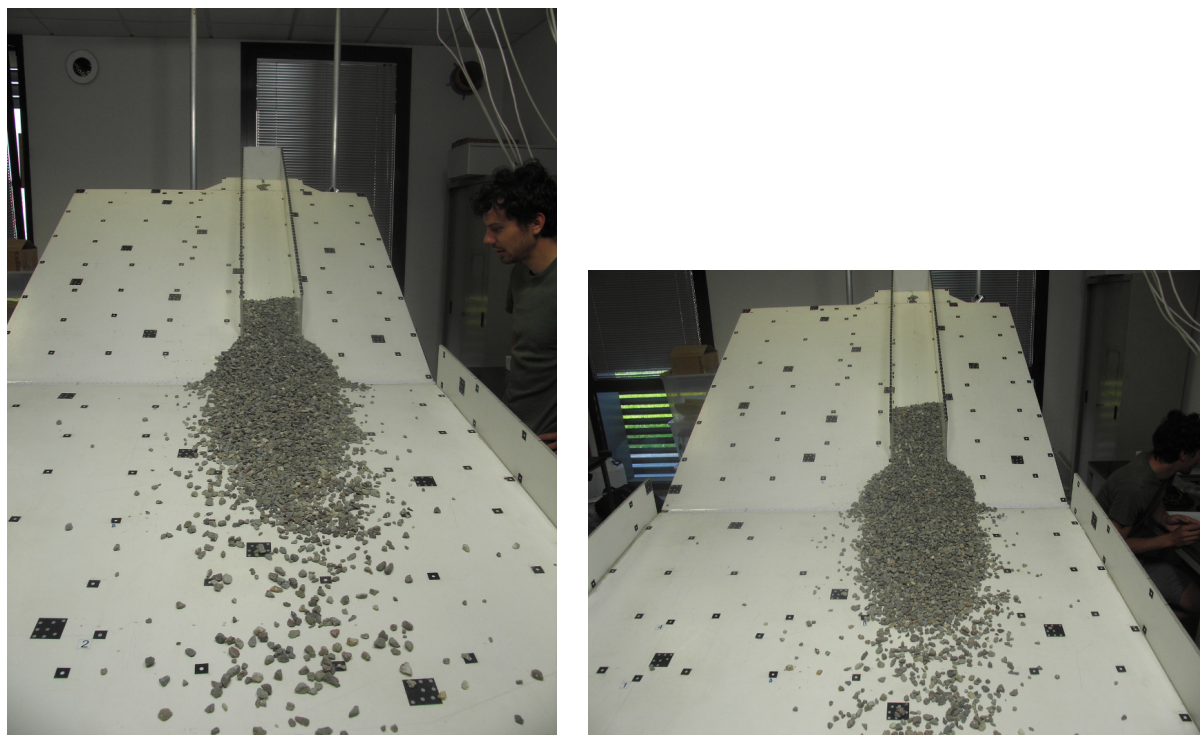


Figura 7.21: Confronto tra le prove incanalate per la ghiaia grossa.

Zeoliti

Dinamica dell'evento Dalla visione trasversale (Figura 7.22) si nota l'effetto prodotto dalla concomitante azione di due movimenti, uno dovuto al rilassamento della superficie libera, l'altro dovuto allo scivolamento in blocco del deposito [1].

Nella fase di scorrimento nel canale è ancora più evidente, in questo caso, la differenza di velocità tra le particelle che percorrono la parte centrale del canale e quelle che si muovono in prossimità delle pareti.

In Figura 7.23 si riconoscono due scie di particelle traccianti in pvc in corrispondenza delle pareti. Queste sono disposte longitudinalmente e posizionate vicino alle sponde, dove la velocità è minore. Tendono, così, ad accumularsi in coda al deposito finale (Figura 7.24) dell'ammasso.

Particolarmente interessante è anche la fase di accumulo a valle. Osservando i video si nota come, contemporaneamente, avvengano due movimenti. Uno è dovuto all'ingresso a velocità sostenuta del flusso di materiale nell'area di deposito, l'altro è dovuto alla propagazione areale del materiale già depositato, propagazione che avviene anche contro pendenza (Figura 7.31).

Confronto tra le prove La posizione e la morfologia del deposito si ripete quasi esattamente (Figura 7.24)

Evoluzione del volume nel tempo con ghiaia e con materiale zeolitico su pendio incanalato L'andamento del volume nelle prove incanalate (Figura 7.25 e 7.26) propone

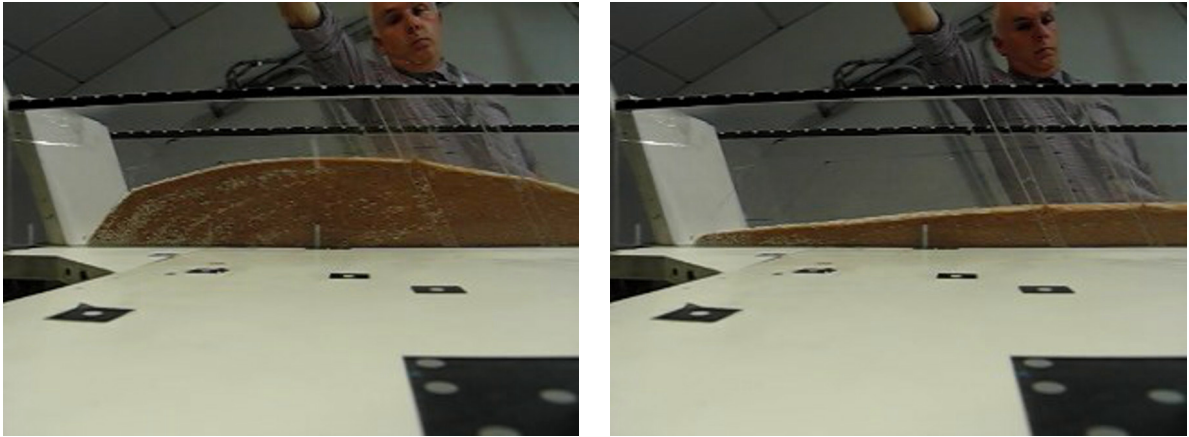


Figura 7.22: Dall'immagine a sinistra si nota come tutta la superficie superiore dell'ammasso risenta immediatamente della romozione della paratia, Osservando il profilo si nota come si formi un'onda che tende a propagarsi verso valle rilassandosi per l'azione del gradiente sulla superficie libera. Nell' immagine a destra un istante finale quando il picco dell'onda ha già abbandonato la zona inquadrata.

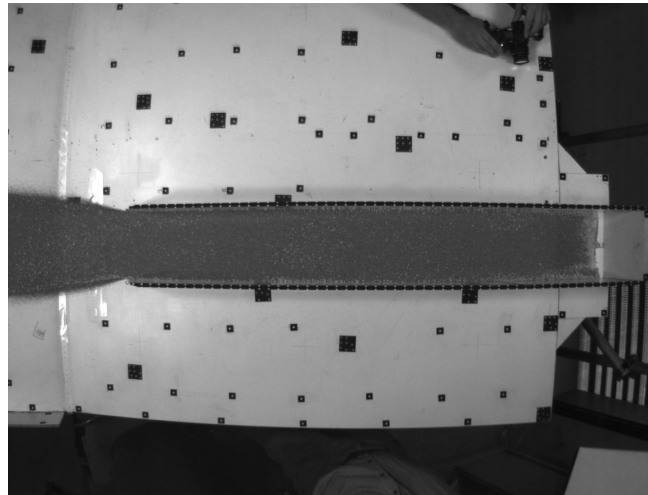


Figura 7.23: Prova eseguita con materiale zeolitico incanalato senza deviatore. Fotogramma ripreso dalla videocamera Basler 1, focale 6mm. Lungo le pareti interne del canale sono visibili scie di traccianti.

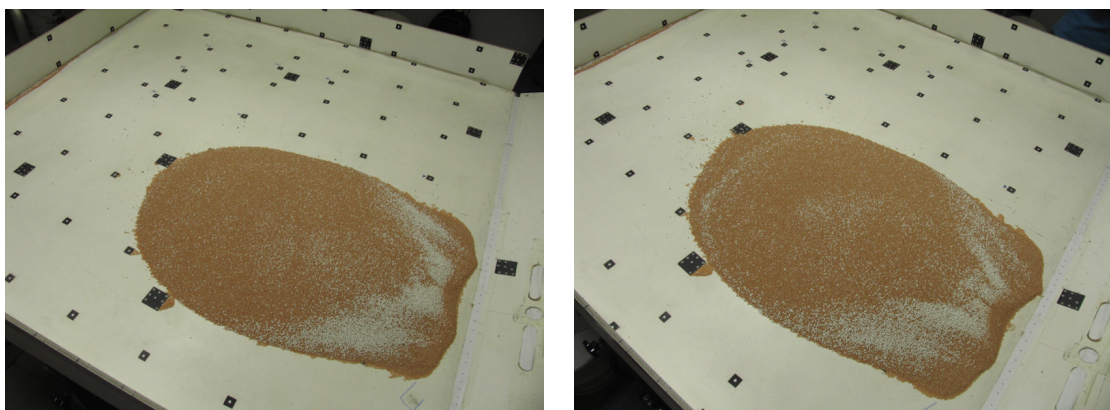


Figura 7.24: Il deposito finale nella prova su pendio incanalato con zeoliti e nella ripetuta.

lo stesso trend osservato nelle prove su pendio aperto (Figura 7.10, Figura 7.14, Figura 7.17).

La presenza del canale limita i fenomeni di espansione e contrazione volumetrica. Le variazioni maggiori si hanno per la ghiaia grossa ma sono comunque inferiori al 15% rispetto al valore iniziale.

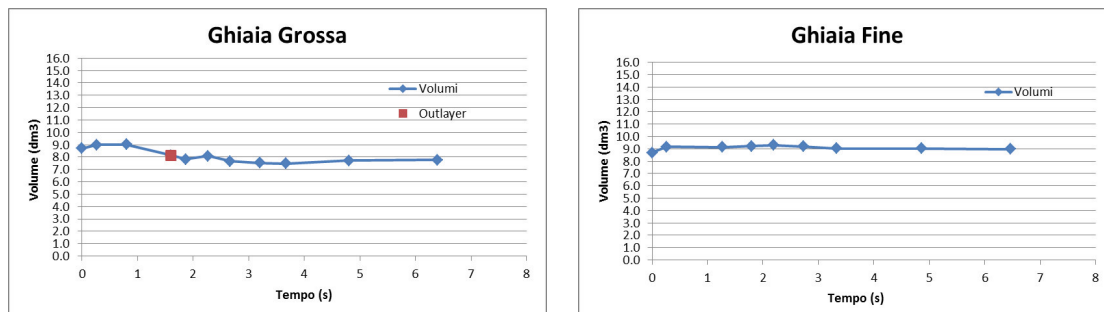


Figura 7.25: A sinistra, l'evoluzione del volume occupato dall'ammasso nelle prove con ghiaia grossa su pendio incanalato; a destra, nel caso di ghiaia fine. L'errore medio stimato su base fotogrammetrica è pari a 0.20 dm^3 . Per il valore rappresentato dal punto rosso l'errore è significativamente maggiore di quello medio.

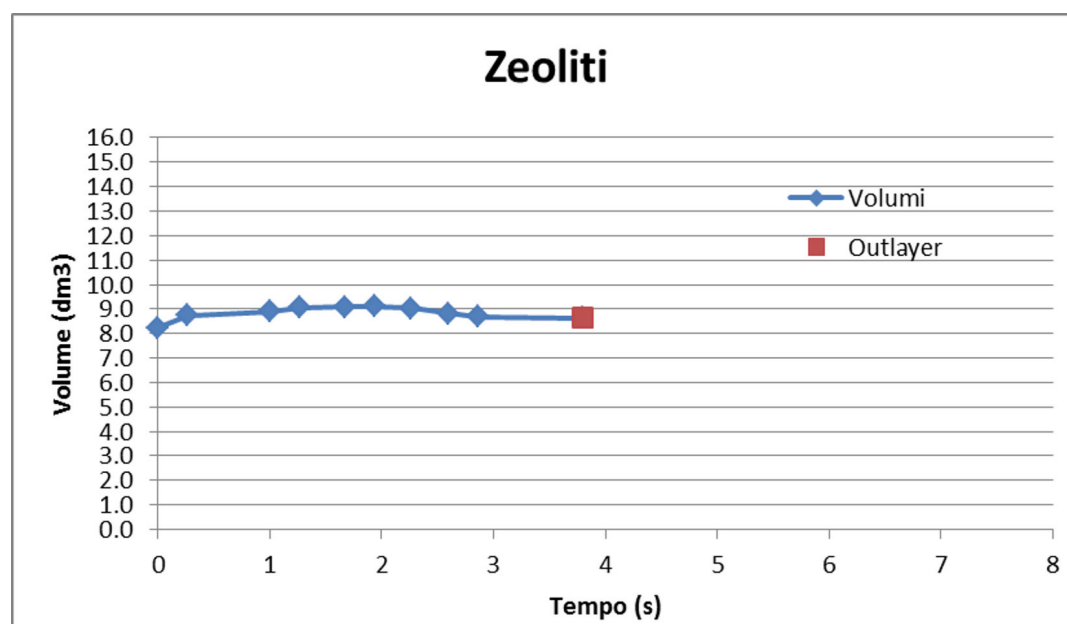


Figura 7.26: L'evoluzione del volume occupato dall'ammasso nelle prove con materiale zeolitico su pendio incanalato. L'errore medio stimato su base fotogrammetrica è pari a 0.19 dm^3 . Per il valore rappresentato dal punto rosso l'errore è significativamente maggiore di quello medio.

Pendio Incanalato con deviatore

Considerato il comportamento della ghiaia fine (un volume non significativo dell'ammasso è in grado di raggiungere il deviatore) sono stati eseguiti test per la ghiaia grossa e per il materiale zeolitico.

L'esposizione si concentra solo sugli aspetti legati alla presenza del deviatore, la parte iniziale del moto (tratto canale) non presenta differenze rispetto alle prove precedentemente descritte.

Ghiaia grossa

Il principale effetto prodotto dal deviatore è quello di rallentare ulteriormente il moto nel pendio di valle (figura 7.27). Conseguentemente il deposito finale si posiziona più in alto rispetto al solo caso incanalato. Solo una piccola parte dell'ammasso impatta direttamente con il deviatore, per cui non si nota molto la variazione di traiettoria del flusso detritico.

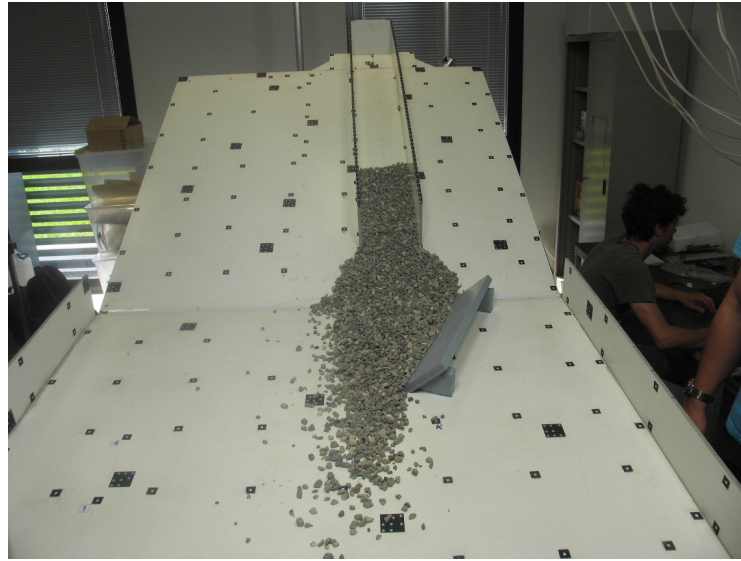


Figura 7.27: Posizione e morfologia del deposito di ghiaia grossa nella configurazione incanalata con deviatore.

Zeoliti

Una parte consistente dell'ammasso impatta contro il deviatore e l'effetto di deviazione è molto significativo (Figura 7.28).

L'interazione con il deviatore provoca addensamento e risalita delle particelle sulla sponda. Nella fase immediatamente successiva il flusso deviato converge verso il centro della canaletta, scontrandosi con il flusso di materiale che non ha subito deviazione (Figura 7.29).

In Figura 7.30 è mostrata una immagine del deposito finale. In Figura 7.31 è mostrato l'effetto di aggiramento del materiale granulare del deviatore di flusso.

Evoluzione del volume nel tempo con ghiaia e con materiale zeolitico su pendio incanalato con deviatore

L'andamento del volume è molto simile (Figura 7.32, Figura 7.33) per entrambi gli ammassi la massima espansione si ha quando il fronte raggiunge il deviatore. In questo istante la superficie occupata è massima. Successivamente l'addensamento nel pendio di valle provoca una contrazione del volume dell'ammasso. La contrazione è più marcata per la ghiaia grossa.

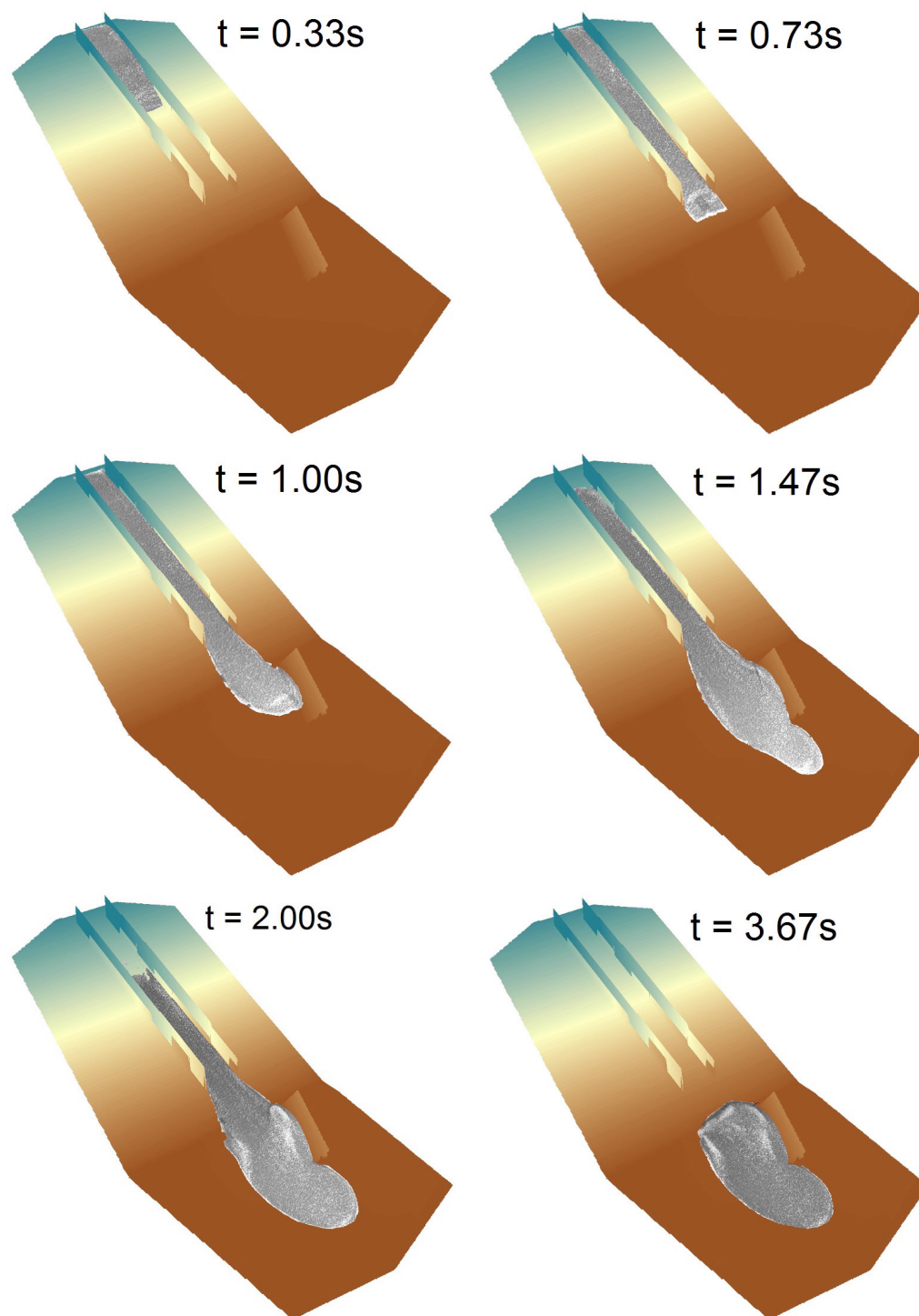


Figura 7.28: DTM in alcuni istanti di tempo, ottenuti dall'elaborazione fotogrammetrica, per la prova incanalata con deviatore, con ammasso granulare zeolitico.

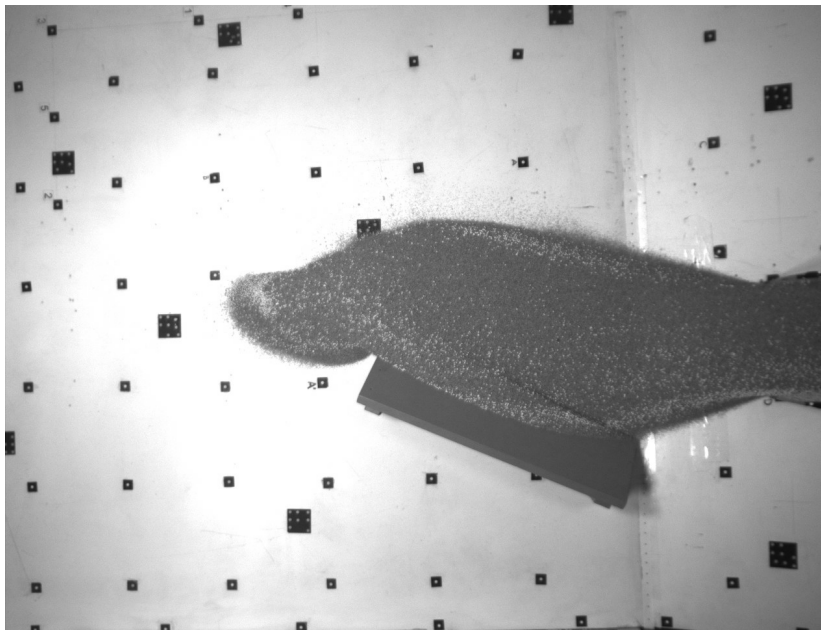


Figura 7.29: Effetto dell'interazione tra il flusso che scende parallelamente al canale e il flusso deviato.

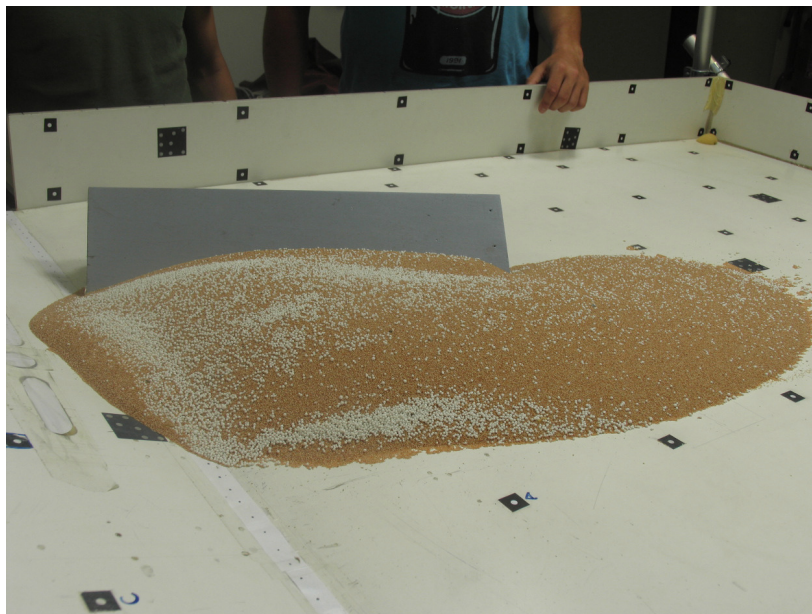


Figura 7.30: Posizione e morfologia del deposito zeolitico, si nota il profilo incurvato lungo il deviatore.

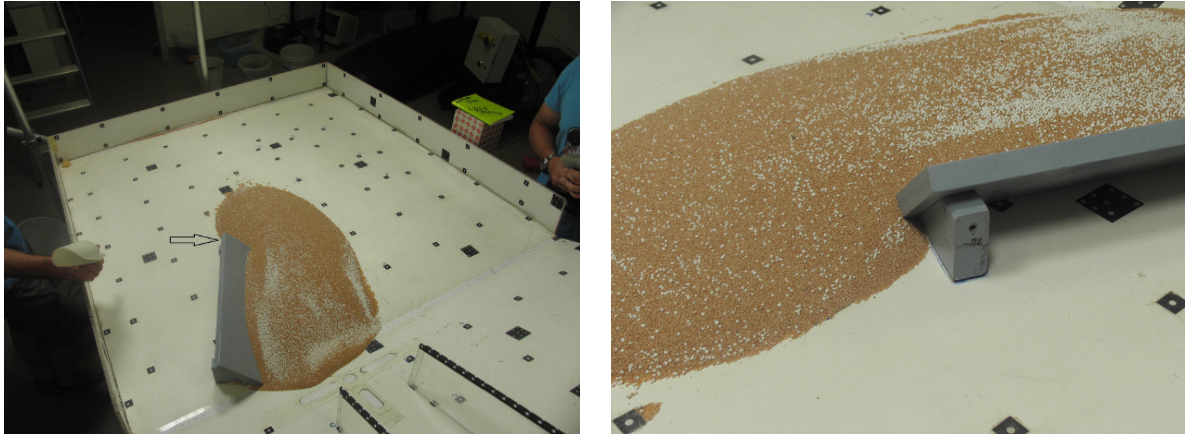


Figura 7.31: Nell'immagine, a sinistra, il deposito ripreso da monte, la freccia indica il punto di vista da dove è stata scattata la foto di destra. Il flusso granulare è in grado di aggirare il deviatore risalendo verso monte.

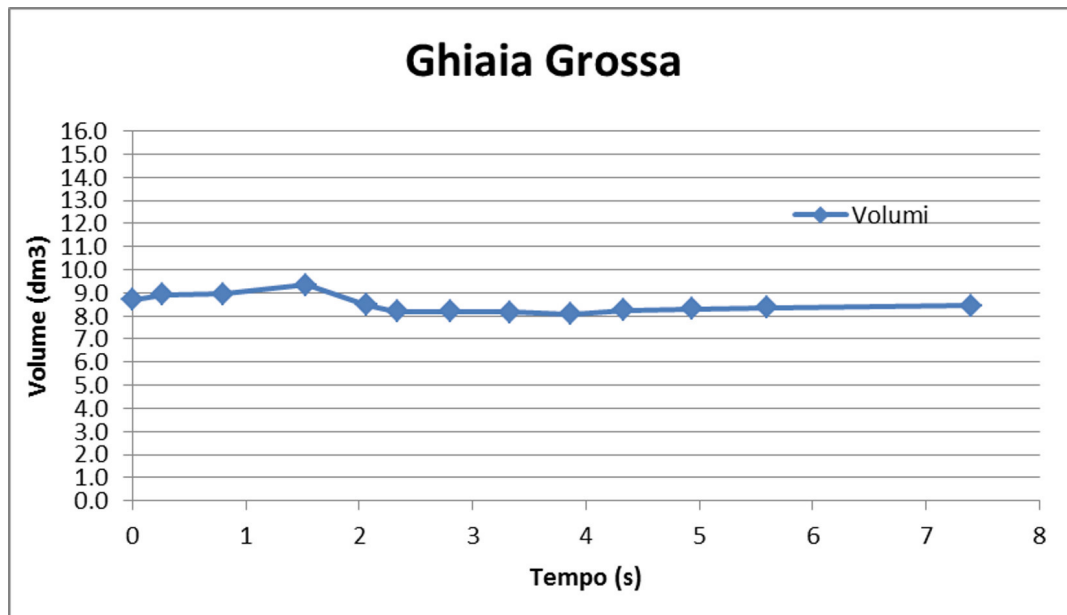


Figura 7.32: Evoluzione nel tempo del volume occupato dall'ammasso costituito da ghiaia grossa, calcolato negli istanti elaborati fotogrammetricamente, nella prova incanalata con deviatore. L'errore medio stimato su base fotogrammetrica è pari a 0.18 dm^3 .

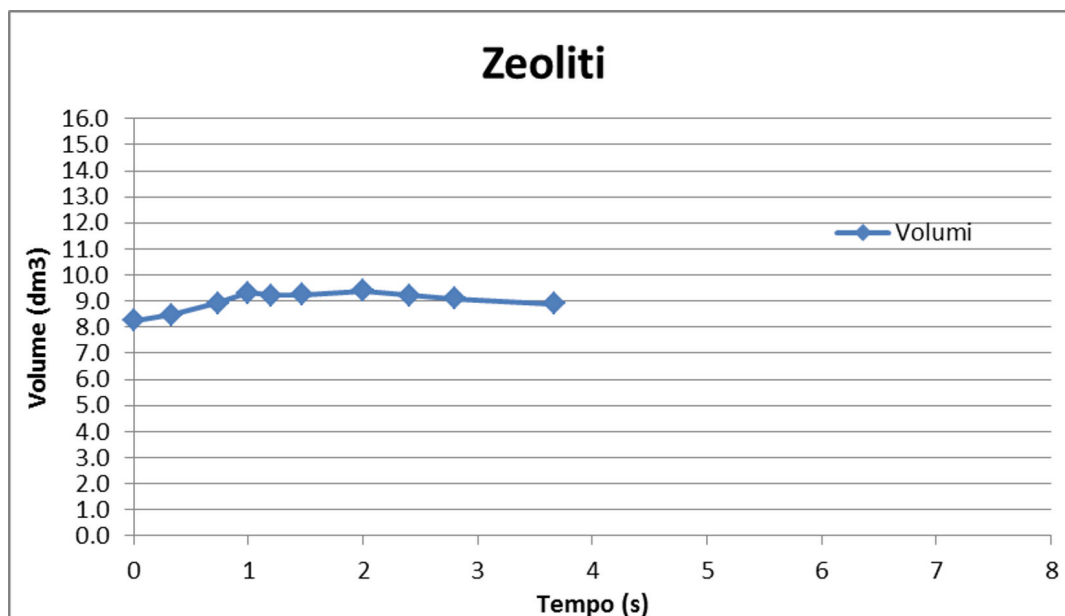


Figura 7.33: Evoluzione nel tempo del volume occupato dall'ammasso costituito da materiale zeolitico, calcolato negli istanti elaborati fotogrammetricamente, nella prova incanalata con deviatore. L'errore medio stimato su base fotogrammetrica è pari a 0.19 dm^3

7.7 Situazioni reali

Nel corso delle uscite in campagna, presso la stazione di monitoraggio di Acquabona nel comune di Cortina d'Ampezzo (BL), sono state osservate situazioni che presentano analogie significative con le prove eseguite in laboratorio.

Durante l'uscita effettuata il 18 marzo 2015 è stata rilevata una valanga di neve densa, in movimento all'interno di un ripido canalone lungo la parete sud del Sorapiss. Il suo comportamento granulare, in assenza di fluido interstiziale, pare ben simulabile dal materiale zeolitico utilizzato in laboratorio. Figura 7.35.

In occasione della uscita effettuata il 29 luglio 2015, è stato possibile fotografare depositi di materiale granulare lungo il rio di Acquabona formati a monte di una ostruzione naturale del canale, in similitudine con la modalità di costituzione del deposito iniziale nelle prove incanalate di laboratorio (Figura 7.34).

7.8 Conclusioni

I test hanno permesso di fare delle osservazioni importanti sul comportamento degli ammassi granulari secchi. In particolare è emersa la grande influenza dei parametri topografici (pendenze, irregolarità del fondo, deviatori) e di attrito sulla dinamica complessiva. Nei contesti reali questo fatto si traduce nella necessità di monitorare continuamente l'evoluzione dei siti attivi.

Le sperimentazioni condotte possono essere utilizzate per la taratura di modelli fisico-numeriche finalizzati alla simulazione dinamica di ammassi granulari.

Nel capitolo che segue verranno descritti alcuni risultati ottenuti dalla applicazione di un modello costruito per la simulazione degli ammassi granulari secchi.

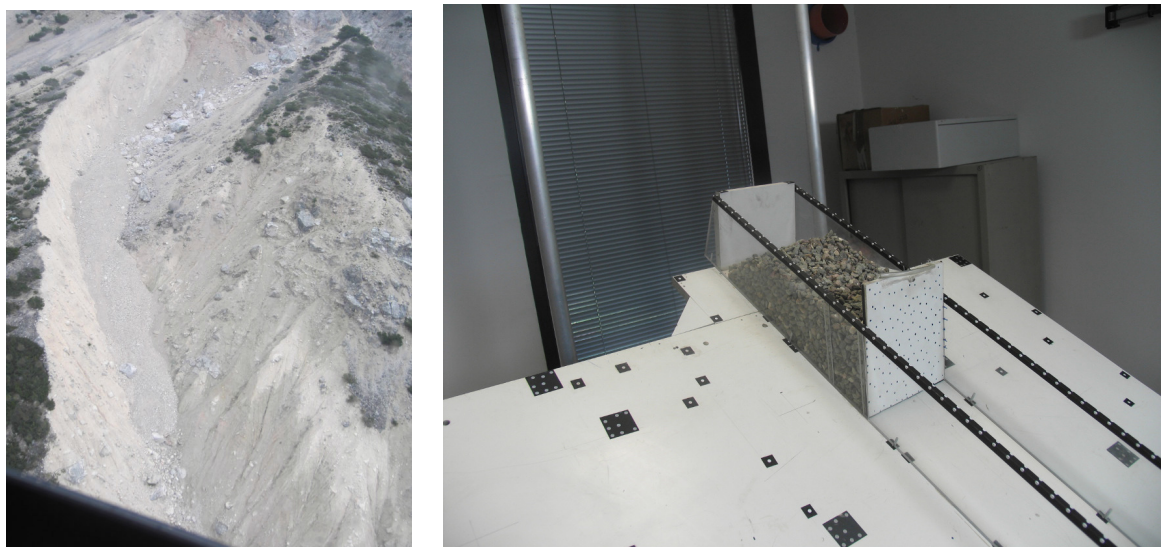


Figura 7.34: A sinistra, un deposito di materiale granulare a monte di una ostruzione naturale nel canale del rio Acquabona. A destra, la modalità con cui il materiale granulare è stato inizialmente disposto nella canaletta sperimentale prima della restituzione in canaletta. Il cedimento del supporto di valle costituisce l'innesco per la movimentazione dell'ammasso.



Figura 7.35: A sinistra, valanga di neve granulare ripresa nel versante meridionale del gruppo del Sorapiss. A destra l'ammasso zeolitico che collide con il deviatore. La natura granulare dei fenomeni permette di accomunarli da un punto di vista reologico.

Capitolo 8

Applicazioni numeriche

8.1 Introduzione

In questo capitolo vengono utilizzati alcuni dati sperimentali, disponibili in letteratura e ottenuti in laboratorio durante questo lavoro di tesi, per testare un modello numerico particellare per la descrizione della dinamica degli ammassi granulari secchi.

Vengono presentati casi di dinamica su fondo orizzontale e casi che simulano alcune situazioni su pendio aperto sul doppio piano inclinato.

In quanto segue viene descritto, nella prima parte, il modello numerico utilizzato e, a seguire, le applicazioni numeriche sui casi di laboratorio.

8.2 Il modello fisico-numerico

Il modello fisico utilizzato considera l'ammasso granulare come costituito dall'insieme delle particelle che lo compongono e analizza il moto delle singole particelle separatamente. Ogni particella è considerata muoversi appartenendo alla superficie di scorrimento. Il moto della singola particella è descritto tenendo conto delle forze che su di essa insistono generate dall'ammasso nel suo complesso e tenendo conto della evoluzione della superficie dell'ammasso. I parametri reologici vengono ottenuti dalle analisi sperimentali effettuate nei capitoli precedenti e dalla letteratura. Ogni particella appartenente all'ammasso viene messa in movimento per una stabilita durata di tempo, definito tempo di rigenerazione dell'ammasso. In corrispondenza del tempo di rigenerazione dell'ammasso l'intero ammasso viene ricostruito sulla base della nuova posizione acquisita da tutte le particelle. Nella successiva fase di calcolo viene considerata la nuova forma dell'ammasso per la descrizione delle forze agenti sulle particelle.

Il modello si basa sulla seconda legge della dinamica espressa dall'equazione:

$$\bar{F} = m \bar{a} \quad (8.1)$$

L'equazione può essere scritta in forma differenziale e approssimata alle differenze finite come segue:

$$\bar{F} = m \frac{d\bar{v}}{dt} \approx m \frac{\bar{v}(t + \Delta t) - \bar{v}(t)}{\Delta t}.$$

La velocità, in un istante di tempo $t + \Delta t$ successivo all'istante t in cui le caratteristiche del moto sono note, può essere approssimata come segue:

$$\frac{\bar{F}}{m} \cdot \Delta t \approx \bar{v}(t + \Delta t) - \bar{v}(t) \implies \bar{v}(t + \Delta t) \approx \bar{v}(t) + \frac{\bar{F}}{m} \cdot \Delta t.$$

Le componenti del vettore velocità sono:

$$\begin{aligned} v_x(t + \Delta t) &\approx v_x(t) + \frac{F_x}{m} \cdot \Delta t \\ v_y(t + \Delta t) &\approx v_y(t) + \frac{F_y}{m} \cdot \Delta t \end{aligned} \quad (8.2)$$

x e y sono le due coordinate orizzontali del sistema di riferimento. Per la determinazione della componente della velocità v_z lungo la direzione verticale z , si sfrutta la condizione di appartenenza alla superficie di scorrimento $S(x, y, z)$, che si esprime come segue:

$$\bar{v} \cdot \text{grad } S(x, y, z) = \bar{0}, \quad (8.3)$$

con ovvio significato dei simboli.

D'altra parte la superficie $S(x, y, z)$ può essere descritta nel modo seguente:

$$S(x, y, z) = z - s(x, y) = 0,$$

e lo sviluppo dell'eq. 8.3 fornisce:

$$\begin{aligned} (v_x, v_y, v_z) \cdot \left(-\frac{\partial s}{\partial x}, -\frac{\partial s}{\partial y}, 1 \right) &= 0; \\ -v_x \cdot \frac{\partial s}{\partial x} - v_y \cdot \frac{\partial s}{\partial y} + v_z &= 0; \\ v_z &= v_x \cdot \frac{\partial s}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial s}{\partial y} \end{aligned} \quad (8.4)$$

Un'altro modo per giungere allo stesso risultato è quello di descrivere lo spostamento dz di una particella quando si muove con una certa velocità sulla superficie di scorrimento:

$$\begin{aligned} dz &= \frac{\partial s}{\partial x} \cdot dx + \frac{\partial s}{\partial y} \cdot dy; \\ \frac{dz}{dt} &= \frac{\partial s}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{\partial s}{\partial y} \cdot \frac{dy}{dt}; \\ v_z &= \frac{\partial s}{\partial x} \cdot v_x + \frac{\partial s}{\partial y} \cdot v_y \end{aligned}$$

Nelle eqq. 8.5 vengono riportati i valori approssimati, alle differenze finite, delle componenti di velocità delle particelle.

$$\begin{aligned} v_x(t + \Delta t) &\approx v_x(t) + \frac{F_x}{m} \cdot \Delta t \\ v_y(t + \Delta t) &\approx v_y(t) + \frac{F_y}{m} \cdot \Delta t \\ v_z(t + \Delta t) &\approx v_x \cdot \frac{\partial s}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial s}{\partial y}. \end{aligned} \quad (8.5)$$

8.2.1 Metodi per la soluzione dell'equazione del moto

Metodo esplicito

Nel metodo esplicito le forze sono valutate rispetto all'istante iniziale di integrazione. Velocità e posizione delle particelle diventano:

$$\begin{aligned}
 v_x(t + \Delta t) &\approx v_x(t) + \frac{F_x(t)}{m} \cdot \Delta t \\
 v_y(t + \Delta t) &\approx v_y(t) + \frac{F_y(t)}{m} \cdot \Delta t \\
 v_z(t + \Delta t) &\approx \frac{\partial s}{\partial x} \cdot v_x(t + \Delta t) + \frac{\partial s}{\partial y} \cdot v_y(t + \Delta t)
 \end{aligned} \tag{8.6}$$

$$\begin{aligned}
 x(t + \Delta t) &\approx x(t) + \frac{v_x(t) + v_x(t + \Delta t)}{2} \cdot \Delta t \\
 y(t + \Delta t) &\approx y(t) + \frac{v_y(t) + v_y(t + \Delta t)}{2} \cdot \Delta t \\
 z(t + \Delta t) &\approx s(x(t + \Delta t), y(t + \Delta t)).
 \end{aligned} \tag{8.7}$$

Metodo implicito

Nel metodo implicito le forze sono valutate facendo la media tra il valore iniziale e quello finale. Le equazioni da risolvere diventano:

$$\begin{aligned}
 v_x(t + \Delta t) &\approx v_x(t) + \frac{1}{m} \frac{F_x(t) + F_x(t + \Delta t)}{2} \cdot \Delta t \\
 v_y(t + \Delta t) &\approx v_y(t) + \frac{1}{m} \frac{F_y(t) + F_y(t + \Delta t)}{2} \cdot \Delta t
 \end{aligned}$$

Alla prima iterazione le equazioni vengono poste come segue:

$$\begin{aligned}
 F_x(t + \Delta t) = F_x(t) &\rightarrow v_x^I(t + \Delta t) \approx v_x(t) + \frac{1}{m} \frac{F_x(t) + F_x(t)}{2} \cdot \Delta t \\
 F_y(t + \Delta t) = F_y(t) &\rightarrow v_y^I(t + \Delta t) \approx v_y(t) + \frac{1}{m} \frac{F_y(t) + F_y(t)}{2} \cdot \Delta t
 \end{aligned}$$

Mentre per la seconda iterazione divengono:

$$\begin{aligned}
 v_x^{II}(t + \Delta t) &\approx v_x(t) + \frac{1}{m} \frac{F_x(t) + F_x^I(t + \Delta t)}{2} \cdot \Delta t \\
 v_y^{II}(t + \Delta t) &\approx v_y(t) + \frac{1}{m} \frac{F_y(t) + F_y^I(t + \Delta t)}{2} \cdot \Delta t
 \end{aligned}$$

e in generale:

$$\begin{aligned}
 v_x^i(t + \Delta t) &\approx v_x(t) + \frac{1}{m} \frac{F_x(t) + F_x^{i-1}(t + \Delta t)}{2} \cdot \Delta t \\
 v_y^i(t + \Delta t) &\approx v_y(t) + \frac{1}{m} \frac{F_y(t) + F_y^{i-1}(t + \Delta t)}{2} \cdot \Delta t
 \end{aligned} \tag{8.8}$$

Le iterazioni continuano fino a quando la seguente condizione è verificata:

$$\begin{aligned}
 v_x^i(t + \Delta t) - v_x^{i-1}(t + \Delta t) &< \epsilon \\
 v_y^i(t + \Delta t) - v_y^{i-1}(t + \Delta t) &< \epsilon
 \end{aligned} \tag{8.9}$$

dove ϵ è un numero reale arbitrariamente piccolo in base alla precisione pretesa dal calcolo.

8.2.2 Le forze applicate alle particelle

Le forze che agiscono sulle particelle sono le seguenti:

- forze di volume (dovute alla gravità);
- forze d'attrito (si considerano le forze di attrito con la superficie di scorrimento);
- forze di resistenza aerodinamica.

Strumenti geometrici per la valutazione delle forze

Il vettore normale alla superficie Per ottenere un vettore unitario normale alla superficie il vettore dev'essere normalizzato rispetto al gradiente.

$$\begin{aligned}\nabla S(x, y, z) &= \text{grad } S(x, y, z) = \left(-\frac{\partial s}{\partial x}, -\frac{\partial s}{\partial y}, 1 \right); \\ \bar{n} &= \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\partial s}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial s}{\partial y}\right)^2 + 1}} \left(-\frac{\partial s}{\partial x}, -\frac{\partial s}{\partial y}, 1 \right).\end{aligned}\quad (8.10)$$

Vettore tangenziale alla superficie lungo la direzione di massima pendenza Rispetto alla superficie indicando con (T_x, T_y, T_z) le componenti tangenziali e con (n_x, n_y, n_z) quelle normali deve valere:

$$(n_x, n_y, n_z) \cdot (T_x, T_y, T_z) = 0 \text{ con } n_x = T_x \text{ e } n_y = T_y;$$

così:

$$(n_x, n_y, n_z) \cdot (n_x, n_y, T_z) = 0;$$

e:

$$T_z = -\frac{n_x^2 + n_y^2}{n_z} = -\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\partial s}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial s}{\partial y}\right)^2 + 1}} \left[\left(\frac{\partial s}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial s}{\partial y}\right)^2 \right];$$

il vettore tangenziale è:

$$(T_x, T_y, T_z) = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\partial s}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial s}{\partial y}\right)^2 + 1}} \cdot \left[-\frac{\partial s}{\partial x}, -\frac{\partial s}{\partial y}, -\left(\frac{\partial s}{\partial x}\right)^2 - \left(\frac{\partial s}{\partial y}\right)^2 \right].$$

il modulo del vettore tangenziale è:

$$\|T\| = \sqrt{\frac{\left(\frac{\partial s}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial s}{\partial y}\right)^2 + \left[\left(\frac{\partial s}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial s}{\partial y}\right)^2 \right]^2}{\left(\frac{\partial s}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial s}{\partial y}\right)^2 + 1}} = \sqrt{\left(\frac{\partial s}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial s}{\partial y}\right)^2}.$$

Il vettore tangenziale unitario alla superficie lungo la direzione di massima pendenza è :

$$\bar{t} = (t_x, t_y, t_z) = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\partial s}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial s}{\partial y}\right)^2 + 1} \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial s}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial s}{\partial y}\right)^2}} \cdot \left\{ -\frac{\partial s}{\partial x}, -\frac{\partial s}{\partial y}, -\left[\left(\frac{\partial s}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial s}{\partial y}\right)^2 \right] \right\}.\quad (8.11)$$

8.2.3 La forza di gravità sulle particelle

la componente normale

Il vettore della forza di gravità normale alla superficie può essere scritto nel modo seguente:

$$\begin{aligned} \bar{F}_{gn} &\equiv (\bar{F}_g \cdot \bar{n}) \cdot \bar{n} \\ \bar{F}_{gn} &\equiv \left[(0, 0, -mg) \cdot \frac{\left(-\frac{\partial s}{\partial x}, -\frac{\partial s}{\partial y}, 1\right)}{\sqrt{\left(\frac{\partial s}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial s}{\partial y}\right)^2 + 1}} \right] \cdot \frac{\left(-\frac{\partial s}{\partial x}, -\frac{\partial s}{\partial y}, 1\right)}{\sqrt{\left(\frac{\partial s}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial s}{\partial y}\right)^2 + 1}} \\ \bar{F}_{gn} &\equiv -\frac{mg}{\left(\frac{\partial s}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial s}{\partial y}\right)^2 + 1} \cdot \left(-\frac{\partial s}{\partial x}, -\frac{\partial s}{\partial y}, 1\right). \end{aligned}$$

La componente normale della forza di gravità è:

$$\|\bar{F}_{gn}\| = \frac{mg}{\sqrt{\left(\frac{\partial s}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial s}{\partial y}\right)^2 + 1}}. \quad (8.12)$$

La componente tangenziale

Il vettore della forza di gravità lungo la direzione di massima pendenza è:

$$\begin{aligned} \bar{F}_{gt} &\equiv (\bar{F}_g \cdot \bar{t}) \cdot \bar{t} \\ \bar{F}_{gt} &\equiv \left[(0, 0, -mg) \cdot \frac{\left[-\frac{\partial s}{\partial x}, -\frac{\partial s}{\partial y}, -\left(\frac{\partial s}{\partial x}\right)^2 - \left(\frac{\partial s}{\partial y}\right)^2\right]}{\sqrt{\left(\frac{\partial s}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial s}{\partial y}\right)^2 + 1}} \right] \cdot \frac{\left[-\frac{\partial s}{\partial x}, -\frac{\partial s}{\partial y}, -\left(\frac{\partial s}{\partial x}\right)^2 - \left(\frac{\partial s}{\partial y}\right)^2\right]}{\sqrt{\left(\frac{\partial s}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial s}{\partial y}\right)^2 + 1}} \\ \bar{F}_{gt} &\equiv \frac{mg}{\left[\left(\frac{\partial s}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial s}{\partial y}\right)^2 + 1\right]} \cdot \left[-\frac{\partial s}{\partial x}, -\frac{\partial s}{\partial y}, -\left(\frac{\partial s}{\partial x}\right)^2 - \left(\frac{\partial s}{\partial y}\right)^2\right] \end{aligned}$$

Le componenti lungo x e lungo y del vettore sono:

$$\begin{aligned} F_{gtx} &= \frac{mg}{\left[\left(\frac{\partial s}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial s}{\partial y}\right)^2 + 1\right]} \cdot \left(-\frac{\partial s}{\partial x}\right); \\ F_{gty} &= \frac{mg}{\left[\left(\frac{\partial s}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial s}{\partial y}\right)^2 + 1\right]} \cdot \left(-\frac{\partial s}{\partial y}\right). \end{aligned} \quad (8.13)$$

8.2.4 La forza d'attrito Coulombiana

La forza di attrito che si genera tra la particella e la superficie di scorrimento viene descritta secondo il modello Coulombiano.

La forza agisce lungo la direzione del vettore velocità con verso contrario a quello della velocità. Il valore di questa forza dipende dal coefficiente d'attrito dinamico μ_D e si può scrivere:

$$\bar{F}_{\mu_D} \equiv -\mu_D \cdot \|\bar{F}_{gn}\| \cdot \bar{i}_v = -\mu_D \cdot \frac{mg}{\sqrt{\left(\frac{\partial s}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial s}{\partial y}\right)^2 + 1}} \cdot \frac{\left(v_x, v_y, \frac{\partial s}{\partial x}v_x + \frac{\partial s}{\partial y}v_y\right)}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2 + \left(\frac{\partial s}{\partial x}v_x + \frac{\partial s}{\partial y}v_y\right)^2}}. \quad (8.14)$$

8.2.5 La forza di resistenza aerodinamica

La forza di resistenza aerodinamica è modellata con i metodi dell'idrodinamica (A. Ghetti, Idraulica). La forza viene fatta dipendere dal quadrato della velocità della particella e dal coefficiente di resistenza idrodinamica, dipendente dalla forma del corpo, dalla sua scabrezza relativa e dal numero di Reynolds. Nei casi qui presentati, data la velocità relativamente bassa e considerato che il fluido nel quale la particella è immersa è costituito da aria, l'effetto di questa componente di resistenza è basso rispetto alle altre.

8.3 Il problema della ricostruzione dell'ammasso - il metodo del raggio d'influenza.

Come scritto in precedenza, la valutazione delle forze agenti sulle particelle viene effettuata tenendo conto della forma della superficie dell'ammasso in movimento e dipende dal suo gradiente. Conseguentemente, si rivela molto importante per la stabilità della soluzione numerica la fase di rigenerazione dell'ammasso. Sono stati testati vari metodi a questo scopo. Qui si presenta il metodo del raggio d'influenza che, rispetto agli altri, ha fornito risultati migliori.

In questo metodo ad ogni particella è associato un raggio d'influenza che dipende dal suo diametro e da un coefficiente di influenza secondo la legge:

$$R_{inf} = C_{inf} \cdot d, \quad (8.15)$$

dove d è il diametro della particella, R_{inf} è il raggio d'influenza e C_{inf} è il fattore di influenza. Il volume assegnato ad un punto generico del DTM è definito come segue:

$$Vol_P = \sum_{i=1}^{N_P} \frac{\frac{4}{3}\pi \frac{d_i^3}{8}}{1-n} \cdot \frac{R_{inf} - dist_{ik}}{R_{inf}}$$

dove n è la porosità del materiale, $dist_{ik}$ è la distanza tra la particella i e il punto considerato del DTM, N_P è il numero di particelle la cui distanza dal punto è inferiore a R_{inf} . Il volume Vol_P può essere riscritto come segue:

$$Vol_P = \frac{\pi}{6} \frac{1}{1-n} \sum_{i=1}^{N_P} d_i^3 \cdot \left(1 - \frac{dist_{ik}}{C_{inf} \cdot d_i}\right).$$

La condizione di conservazione della massa, nella ipotesi di porosità costante, viene utilizzata per determinare la profondità dell'ammasso in corrispondenza dei punti pivotali del DTM. Viene definita una costante di volume, C_{vol} , come segue:

$$\sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_c} C_{vol} Vol_{ij} = Vol = \sum_{i=1}^N \frac{4}{3} \pi \frac{d_i^3}{8} \frac{1}{1-n}.$$

dove N_r e N_c sono rispettivamente il numero di righe e il numero di colonne del DTM utilizzato. Il valore della costante di volume è quindi:

$$C_{vol} = \frac{Vol}{\sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_c} Vol_{ij}},$$

e la profondità del materiale in ogni cella diviene:

$$h_{ij} = \frac{C_{vol} \cdot Vol_{ij}}{a \cdot b},$$

dove a and b sono la lunghezza e la larghezza delle celle del DTM.

8.4 Preparazione ai test numerici

Nel presente lavoro vengono presentati i primi test numerici sviluppati con il modello sopra descritto, con lo scopo di mettere in evidenza il comportamento in alcune situazioni analizzate sperimentalmente.

Per l'esecuzione dei test numerici è stata creata una routine, nel linguaggio di programmazione C++, per la generazione del DTM di un tronco-cono di materiale su un doppio piano inclinato che possa rappresentare le varie configurazioni di laboratorio.

Si vuole ottenere un DTM come quello di Figura 8.1.

Se la rotazione del piano di monte e del cono avviene attorno all'asse y , si utilizza la matrice di rotazione descritta in eq. 8.16:

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}. \quad (8.16)$$

Allo scopo di determinare le coordinate dei punti del piano e del tronco-cono ruotati, è necessario disporre delle coordinate nella configurazione non ruotata. Il piano su cui il tronco-cono è appoggiato è inizialmente orizzontale, così $z(x, y) = 0$, mentre il tronco-cono può essere rappresentato come segue (eq. 8.17):

$$\begin{aligned} H - (\tan \beta) \cdot \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2} & \text{ se } r \leq \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2} \leq R \\ 0 & \text{ se } \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2} > R \\ h & \text{ se } \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2} < r \end{aligned} \quad (8.17)$$

dove H è la altezza del cono, β è l'angolo sull'orizzontale della superficie del cono, h è l'altezza del cono nella zona troncata, (x_c, y_c) è il centro della base del tronco-cono, R è il raggio del cerchio di base del tronco-cono e r è il raggio del cerchio alla quota di troncamento.

Il sistema di equazioni che mette in relazione i punti del cono non ruotato (x, y, z) e i corrispondenti punti sul tronco-cono ruotato (x_2, y_2, z_2) è il seguente (eq. 8.18):

$$\begin{aligned} x_2 &= x \cos \alpha - \left(H - (\tan \beta) \cdot \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2} \right) \cdot \sin \alpha \\ y_2 &= y \\ z_2 &= x \sin \alpha + \left(H - (\tan \beta) \cdot \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2} \right) \cdot \cos \alpha \end{aligned} \quad (8.18)$$

Nella costruzione del DTM del tronco-cono e del piano ruotati, le variabili sono x e z_2 . La prima variabile può essere determinata dalla prima equazione, la seconda dalla terza.

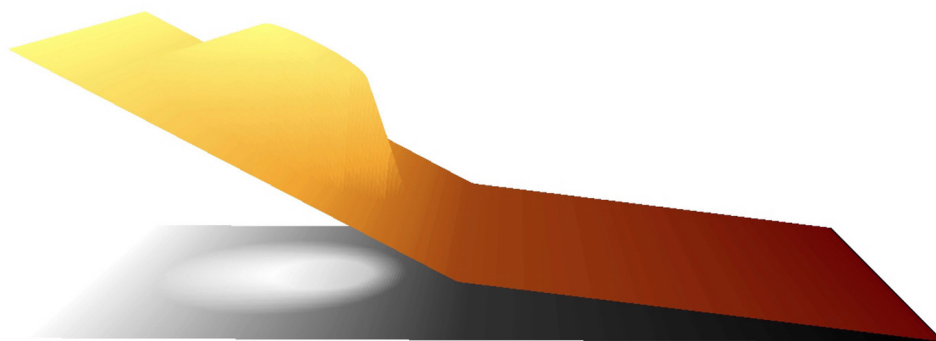


Figura 8.1: Raster di un tronco-cono appoggiato su un piano inclinato a forte pendenza a sua volta connesso ad un piano inclinato di pendenza minore.

8.5 Simulazione di un ammasso tronco-conico su piano orizzontale.

Una prima serie di applicazioni numeriche sono state eseguite riproducendo il rilascio su un piano orizzontale di un ammasso granulare, al quale è stata data una forma iniziale tronco-conica. In queste prove è stato utilizzato materiale zeolitico e due contenitori tronco-conici, uno con superficie laterale di inclinazione 40° (altezza pari a 20cm , diametro inferiore pari a 57.7cm) e un secondo con superficie laterale di inclinazione 50° (altezza pari a 20cm , diametro inferiore pari a 43.6cm). In entrambi i casi l'angolo di inclinazione dei coni è superiore all'angolo di natural declivio del materiale granulare.

Alla rimozione impulsiva del contenitore tronco-conico, l'azione della gravità sull'ammasso provoca il collasso della sua forma iniziale. In quanto segue vengono descritti i risultati della modellazione numerica dell'evoluzione morfologica dell'ammasso. I risultati ottenuti vengono confrontati con i risultati sperimentali ad arresto avvenuto.

8.5.1 Tronco-cono con inclinazione di 40°

In Figura 8.2 è riportata l'evoluzione del materiale granulare zeolitico al quale è stata data la forma iniziale di un tronco-cono con angolo di inclinazione della superficie laterale pari a

40°. L'angolo d'attrito sul fondo, determinato sperimentalmente, è pari a 22°. In figura sono rappresentati vari istanti di tempo durante la sua evoluzione.

In Figura 8.3 è mostrato il confronto tra il risultato sperimentale e quello numerico, ottenuto assegnando al coefficiente di influenza il valore di 250. La analisi sui valori più appropriati da attribuire al coefficiente di influenza del metodo di rigenerazione dell'ammasso ha mostrato una dipendenza importante dalla dimensione dell'ammasso stesso. Le migliori rappresentazioni numeriche degli esperimenti di laboratorio sono state ottenute per coefficienti di influenza che estendono l'influenza della singola particella a tutto l'ammasso. Nel caso descritto in figura si nota una buona generale aderenza ai risultati sperimentali delle elaborazioni numeriche. La superficie numerica oscilla attorno alla superficie sperimentale acquisendo centralmente una profondità minore di circa il 10%.

In Figura 8.4 sono mostrate alcune viste dell'ammasso durante gli istanti iniziali della sua evoluzione, nei quali si verifica la maggior parte della sua deformazione.

8.5.2 Tronco-cono con inclinazione di 50°

In Figura 8.5 viene mostrato il confronto tra i risultati sperimentali e l'applicazione numerica del prova eseguita con lo stesso materiale del test precedente ma utilizzando un tronco-cono con superficie laterale di inclinazione maggiore, pari a 50°.

Le prove svolte consentono da un lato di apprezzare la capacità del modello di simulare in modo soddisfacente il test sperimentale e dall'altro mettono in evidenza la stretta dipendenza dal coefficiente d'influenza.

L'eq. 8.15 fa dipendere il raggio d'influenza dal coefficiente di influenza e dal diametro della particella. Nei test eseguiti per la determinazione del più adatto coefficiente da adottare nelle simulazioni numeriche si è ottenuta una relazione del tipo:

$$C_{inf} = \frac{D_{cono}}{d}, \quad (8.19)$$

dove D_{cono} è il diametro inferiore del tronco-cono e d è il diametro delle particelle. La relazione funziona particolarmente bene se viene inserito il diametro massimo delle particelle.

L'uso di un appropriato coefficiente di influenza è fondamentale allo scopo di mantenere una superficie regolare nei processi di rigenerazione dell'ammasso e consentire una soluzione numerica fisicamente accettabile.

Sostituendo C_{inf} nella eq. 8.15 e considerando il diametro massimo si ottiene la relazione (8.20):

$$R_{inf} = D_{cono} \cdot \frac{d}{d_{max}}. \quad (8.20)$$

Qualunque sia il valore del diametro d si avrà allora:

$$\frac{d}{d_{max}} \leq 1$$

quindi:

$$R_{inf} \leq D_{cono} \quad (8.21)$$

Quando la condizione (8.21) è rispettata, il modello presenta una buona stabilità numerica. Nelle simulazioni sopra presentate si è adottato il criterio appena descritto.

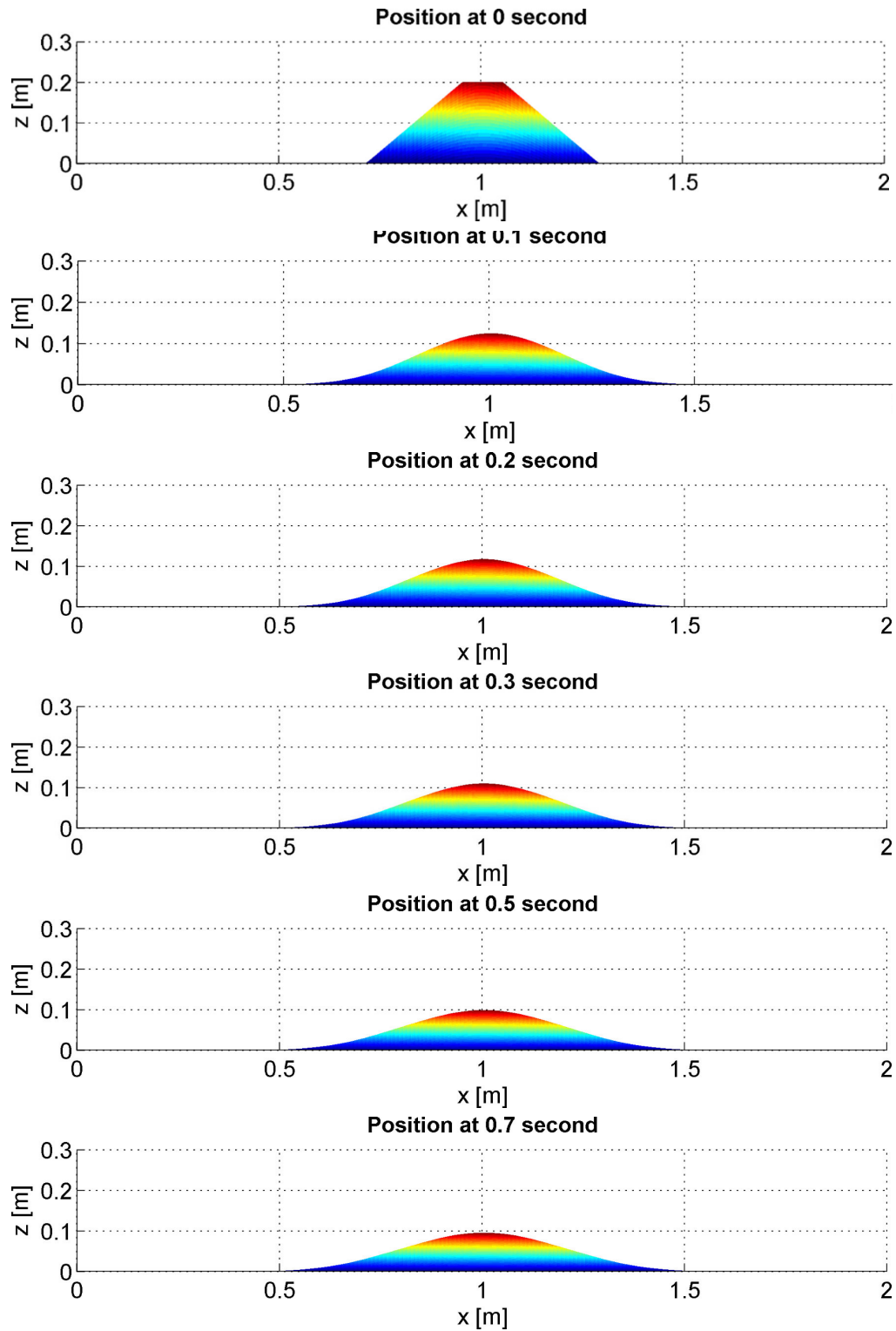


Figura 8.2: Sezioni trasversali della forma assunta da un ammasso granulare zeolitico contenuto inizialmente in un contenitore tronco-conico di altezza 20 cm, diametro di base pari a 57.7 cm e angolo di inclinazione della superficie laterale pari a 40 gradi. L'angolo di attrito tra il materiale e il fondo è pari a 22 gradi.

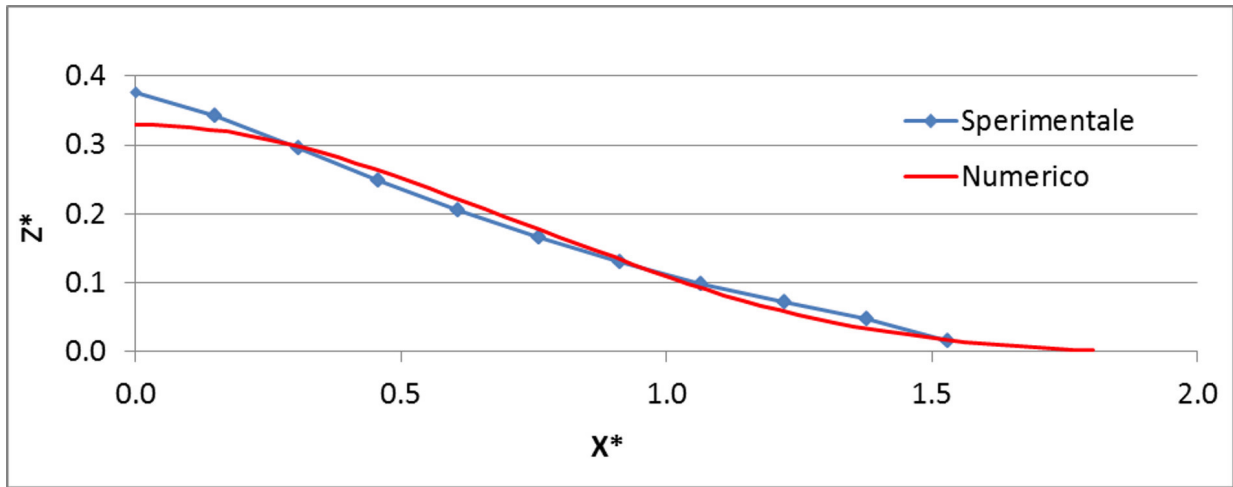


Figura 8.3: Andamento della profondità all'arresto dell'ammasso, adimensionalizzata con la altezza massima iniziale, rispetto alla distanza dal centro della forma tronco-conica, anch'essa adimensionalizzata con la altezza massima iniziale, per il test di Figura 8.2.

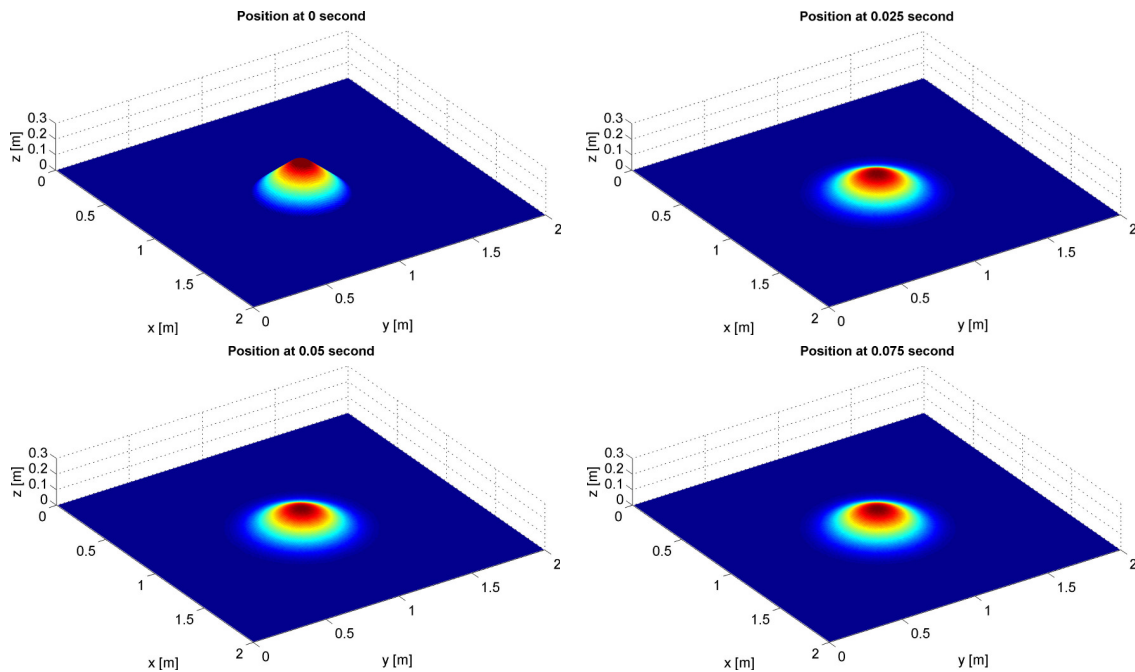


Figura 8.4: Viste del test di Figura 8.3 in alcuni istanti iniziali del moto, durante i quali si verifica la maggior parte della deformazione dell'ammasso.

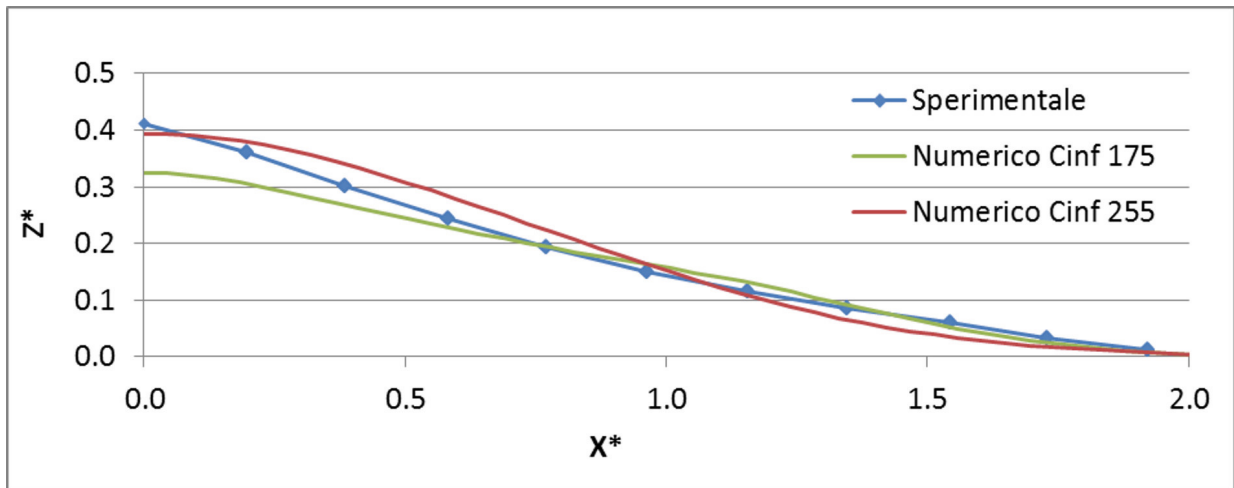


Figura 8.5: Andamento della profondità all'arresto dell'ammasso, adimensionalizzata con la altezza massima iniziale, rispetto alla distanza dal centro della forma tronco-conica, anch'essa adimensionalizzata con la altezza massima iniziale, per il test eseguito con un tronco-cono con superficie inclinata di 50 gradi. Sono mostrati i profili numerici ottenuti con due diversi coefficienti d'influenza (C_{inf}).

8.6 Simulazioni su pendio aperto

I risultati delle simulazioni vengono presentati mediante viste prospettiche dell'intero ammasso in vari istanti di tempo e mediante l'andamento lungo sezioni trasversali e longitudinali collocate come indicato in Figura 8.6.

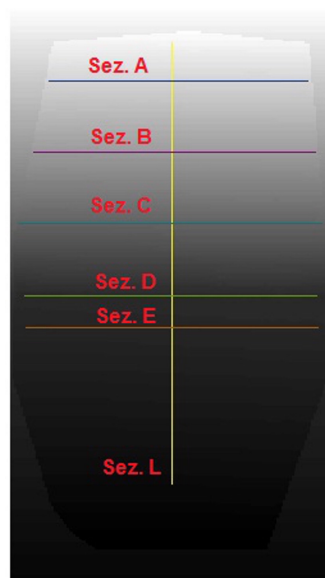


Figura 8.6: Posizioni delle sezioni trasversali (A, B, C, D, E) e della sezione longitudinale (L) utilizzate per la rappresentazione dei risultati sperimentali e numerici.

Simulazione su pendio aperto con ghiaia grossa

In Figura 8.7 sono mostrate le viste assonometriche della evoluzione dell'ammasso di ghiaia grossa rilevate in laboratorio con le tecniche fotogrammetriche e ottenute dalle applicazioni numeriche. L'angolo d'attrito utilizzato nelle elaborazioni numeriche è stato di 31° , il coefficiente di influenza adottato è stato pari a 35. Le celle del DTM numerico hanno lato di lunghezza 5 cm.

In Figura 8.8 sono riportate le sezioni longitudinali rilevate sperimentalmente e ottenute numericamente per alcuni istanti di tempo. In Figura 8.9 e Figura 8.10 sono mostrate le sezioni trasversali, sperimentali e numeriche, al variare del tempo.

In questo caso il comportamento sperimentale dell'ammasso mostra significative differenze rispetto al comportamento numerico. La ragione principale dipende dal valore assunto dall'angolo di attrito tra il materiale e il fondo, rispetto all'angolo sull'orizzontale del piano di monte, essendo quest'ultimo minore rispetto al precedente. Il modello numerico permette la movimentazione solo del materiale che presenta un angolo di attrito minore rispetto all'angolo del fondo. Questo implica il movimento solo di una parte del materiale collocato nel contenitore tronco-conico iniziale dipendente dal gradiente della superficie libera. Cionostante i primi istanti sono descritti numericamente in modo adeguato, fino a 0.4 s dall'inizio del moto. In seguito la massa movimentata inizialmente prosegue la sua corsa verso valle mentre gran parte del volume iniziale si stabilizza a monte. In Figura 8.8, all'istante di tempo pari a 0.4s, si osserva una risalita del materiale che dipende dal metodo del raggio di influenza attualmente adottato per la rigenerazione della massa (il metodo distribuisce volume in tutte le celle all'interno del raggio di influenza, anche nelle celle dove non sono presenti particelle). Nel test di laboratorio, tutto il materiale raggiunge la zona del cambio di pendenza. Questo avviene a conseguenza del comportamento a grano singolo del materiale ghiaioso nella parte posteriore dell'ammasso, che non è più rappresentato dall'angolo d'attrito radente determinato sperimentalmente e dipendente invece dall'angolo d'attrito volvente, sensibilmente minore. Anche per quanto riguarda l'espansione laterale (Figura 8.8, sez. A e sez. B, all'istante 0.4 s), è la fase iniziale del moto l'unica che viene simulata in modo soddisfacente.

Simulazione su pendio aperto con zeoliti

In Figura 8.11 sono mostrate le viste assonometriche della evoluzione dell'ammasso di ghiaia grossa rilevate in laboratorio con le tecniche fotogrammetriche e ottenute dalle applicazioni numeriche. L'angolo d'attrito utilizzato nelle elaborazioni numeriche è stato di 21° , il coefficiente di influenza adottato è stato pari a 84. Le celle del DTM numerico hanno lato di lunghezza 1cm.

In Figura 8.12 sono riportate le sezioni longitudinali rilevate sperimentalmente e ottenute numericamente per alcuni istanti di tempo. In Figura 8.13 e Figura 8.14 sono mostrate le sezioni trasversali, sperimentali e numeriche, al variare del tempo.

In questo caso tutto il materiale inizialmente depositato nel contenitore tronco-conico raggiunge il piano di valle. I tempi di sviluppo del fenomeno in laboratorio appaiono leggermente più brevi rispetto a quelli numerici. L'espansione laterale è colta con buona approssimazione. La distanza d'arresto longitudinale differisce di poco. La forma tipica dei depositi di materiale granulare secco [3], che presentano maggiori spessori nella parte a monte del deposito e che è confermata nell'esperimento fisico, viene colta solo in parte dal modello numerico.

I depositi ai vari istanti di tempo mostrano, soprattutto ad espansione laterale significativa, ondulazioni superficiali che possono essere ricondotte al coefficiente di influenza che è

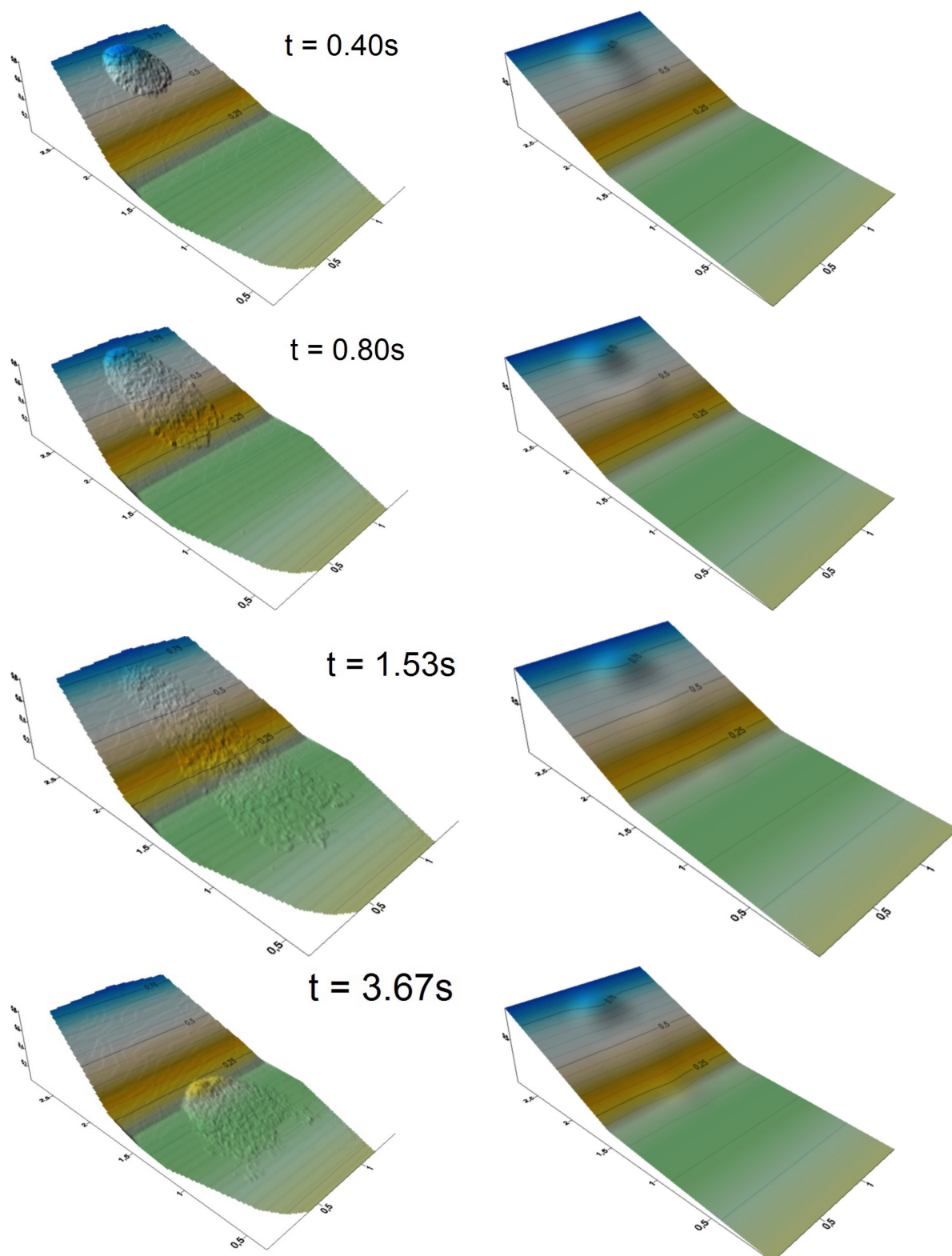


Figura 8.7: Viste della evoluzione morfologica dell'ammasso granulare costituito da ghiaia grossa dalla forma tronco-conica iniziale fino all'arresto. A sinistra i dtm ottenuti fotogrammetricamente in laboratorio; a destra i dtm ottenuti dalla analisi numerica.

stato assunto costante in funzione della superficie inizialmente occupata dall'ammasso. In definitiva, i risultati numerici ottenuti in questa configurazione, con un modello non ancora ottimizzato, sembrano confermare la validità del semplice approccio fisico adottato. Si deve comunque rilevare che la semplicità della modellazione fisica adottata ha come conseguenza la necessità di un elevato tempo di calcolo. Nel caso presente sono state generate circa 180.000 particelle con un tempo di calcolo pari a circa 4 ore di un processore intel I7 con 4 GB di memoria ram.

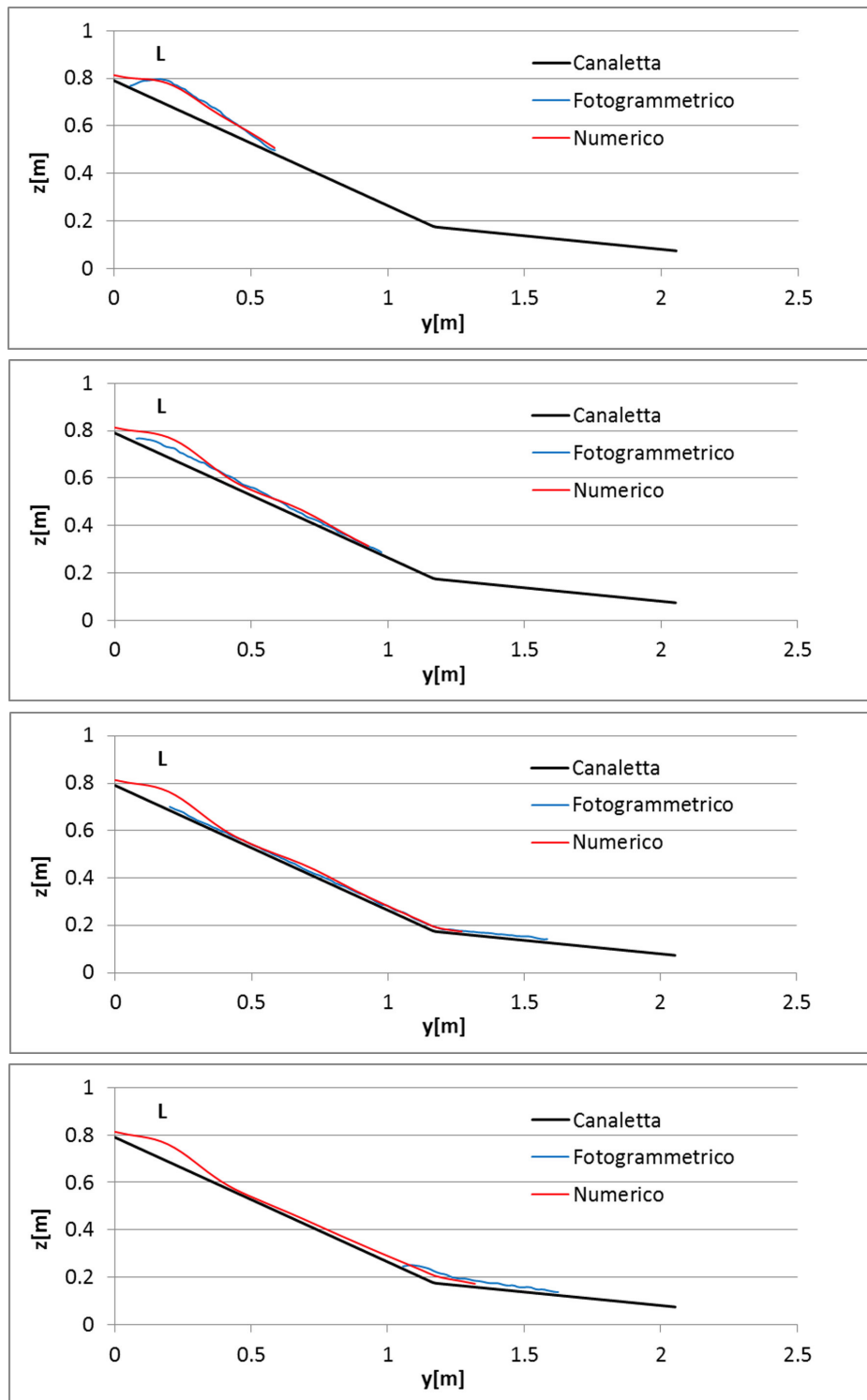


Figura 8.8: Test su pendio aperto con ghiaia grossa. Confronto tra l'andamento della superficie libera sperimentale e numerica agli istanti di tempo $t = 0.4$ s, 0.8 s, 1.53 s, 3.67 s, lungo la sezione longitudinale L di Figura 8.6.

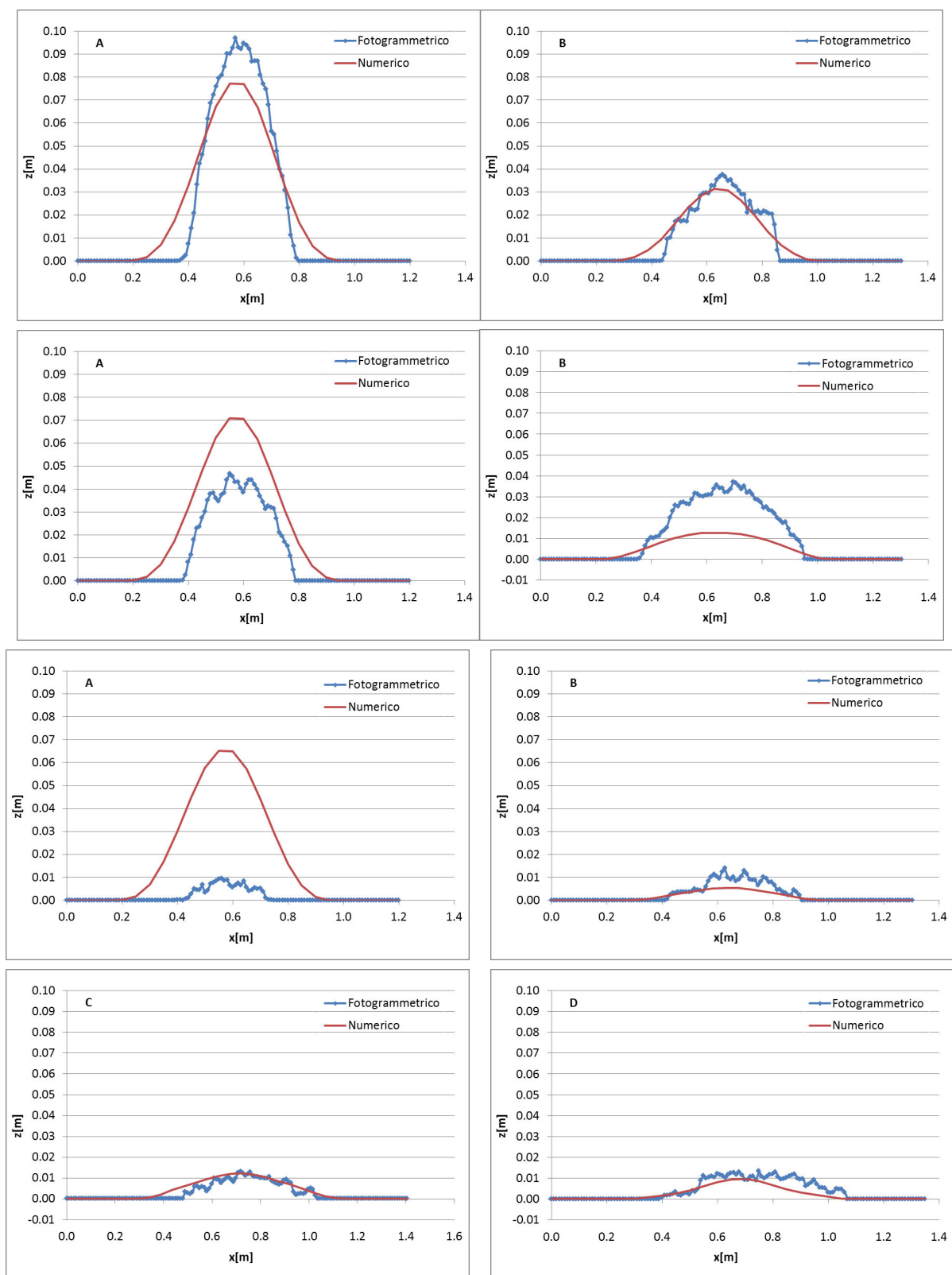


Figura 8.9: Test su pendio aperto con ghiaia grossa. Confronto tra l'andamento della superficie libera sperimentale e numerica, lungo le sezioni trasversali indicate in figura (Figura 8.6), agli istanti di tempo $t = 0.4$ s, sezioni A e B, $t = 0.8$ s, sezioni A e B, e $t = 1.53$ s, sezioni A, B, C e D.

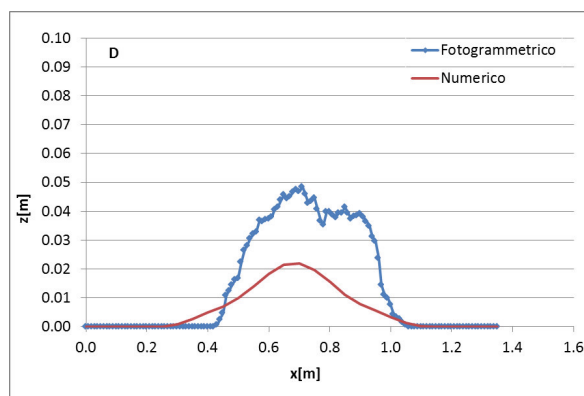


Figura 8.10: Test su pendio aperto con ghiaia grossa. Confronto tra l'andamento della superficie libera sperimentale e numerica lungo la sezione trasversale D (Figura 8.6), all'istante di tempo $t = 3.67$ s.

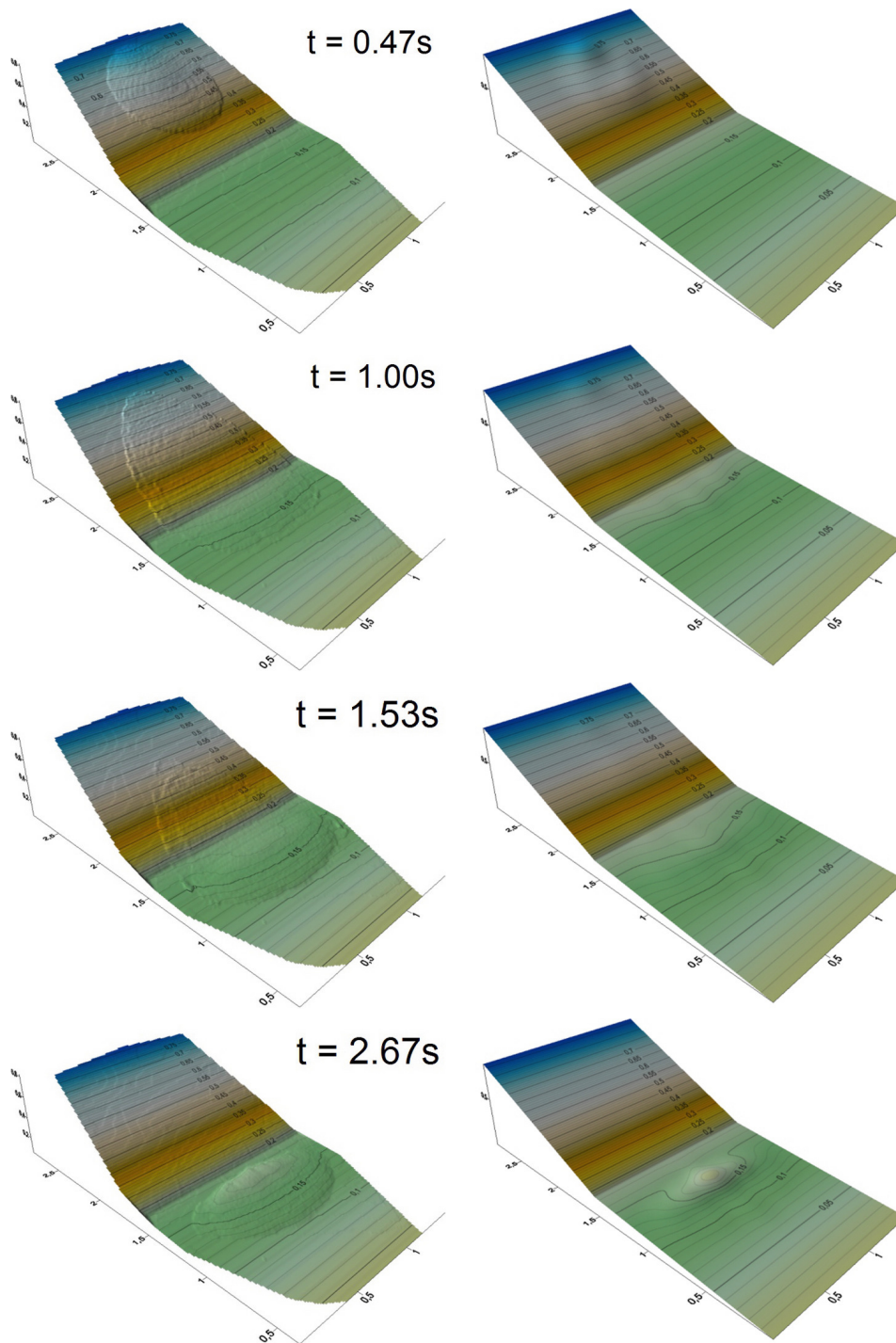


Figura 8.11: Viste della evoluzione morfologica dell'ammasso granulare costituito da zeoliti dalla forma tronco-conica iniziale fino all'arresto. A sinistra i dtm ottenuti fotogrammetricamente in laboratorio; a destra i dtm ottenuti dalla analisi numerica.

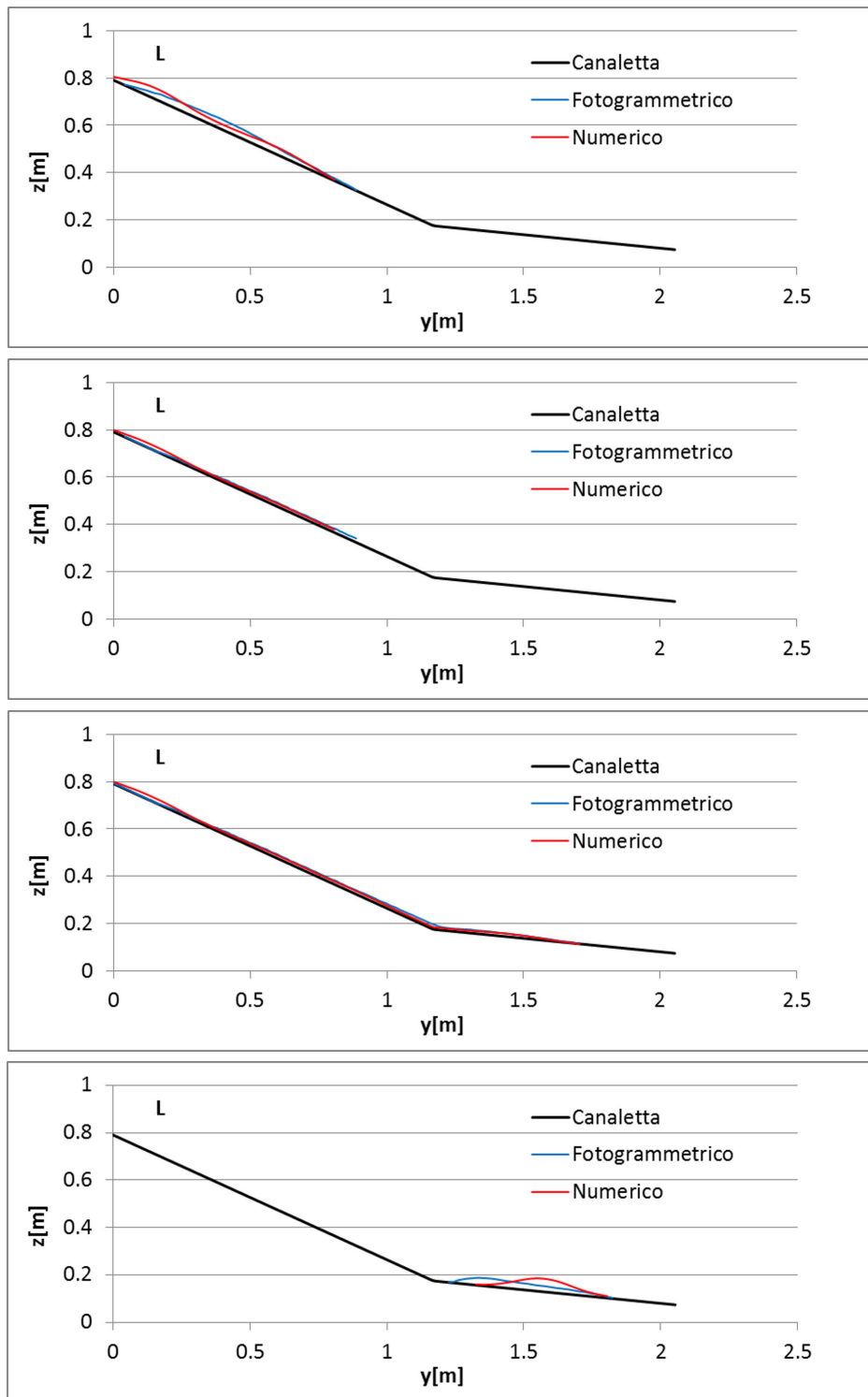


Figura 8.12: Test su pendio aperto con materiale zeolitico. Confronto tra l'andamento della superficie libera sperimentale e numerica agli istanti di tempo $t = 0.4$ s, 1.0 s, 1.53 s, 2.67 s, lungo la sezione longitudinale L di Figura 8.6.

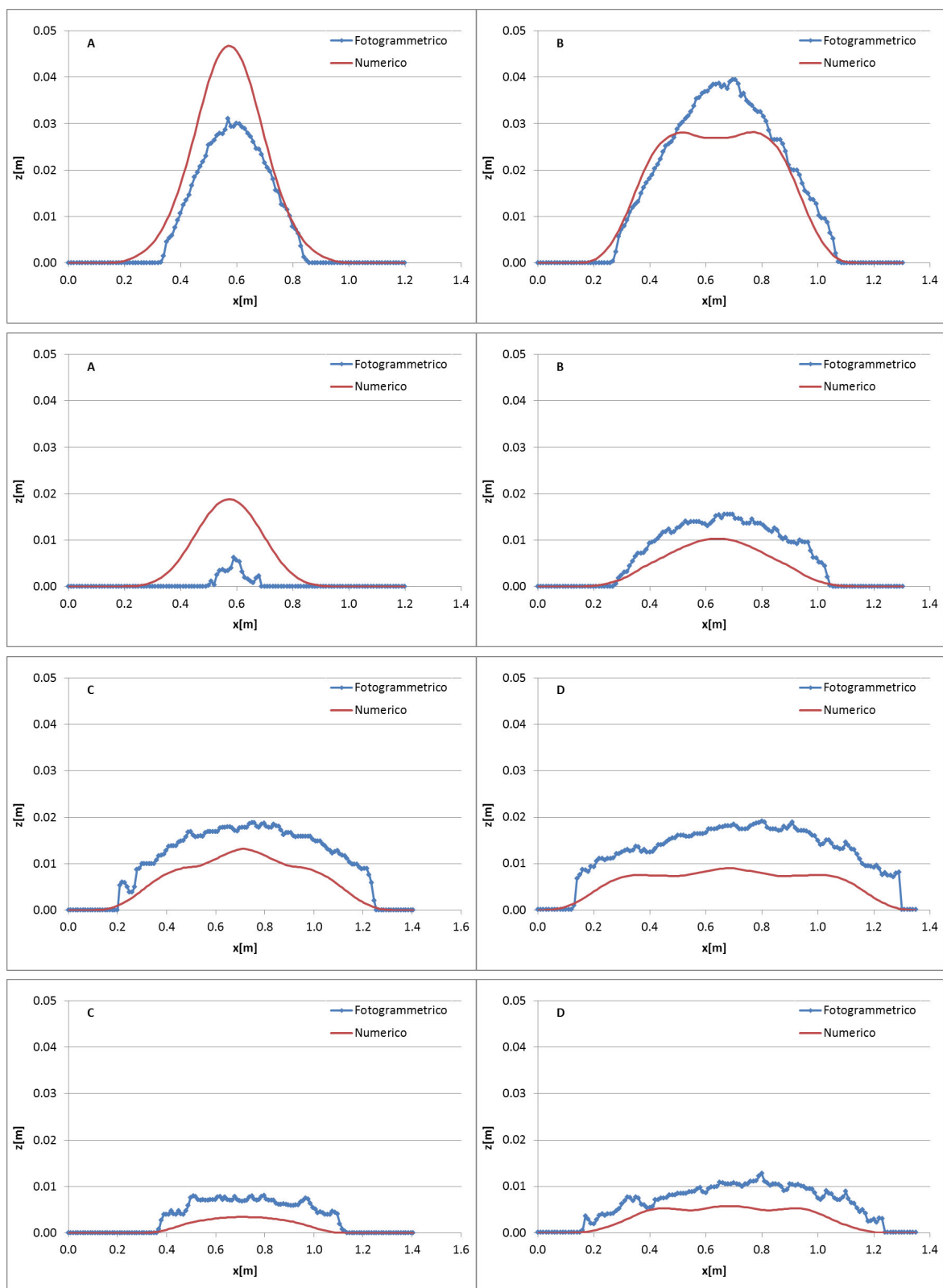


Figura 8.13: Test su pendio aperto con materiale zeolitico. Confronto tra l'andamento della superficie libera sperimentale e numerica lungo le sezioni trasversali indicate in figura (Figura 8.6), agli istanti di tempo $t = 0.4$ s, sezioni A e B, $t = 1.0$ s, sezioni A, B, C e D, e $t = 1.53$ s, sezioni C e D.

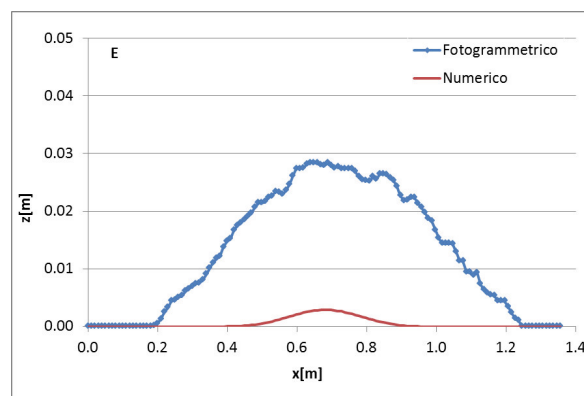


Figura 8.14: Test su pendio aperto con materiale zeolitico. Confronto tra l'andamento della superficie libera sperimentale e numerica lungo la sezione trasversale E (Figura 8.6), all'istante di tempo $t = 2.67$ s.

Capitolo 9

Conclusioni

Presso il Laboratorio di Idrogeologia del Dipartimento di Geoscienze dell'Università degli Studi di Padova è stato utilizzato un apparato sperimentale con lo scopo di descrivere tridimensionalmente, con tecniche fotogrammetriche, il movimento di un ammasso granulare in movimento sopra una canaletta sperimentale costituita da due piani a diversa pendenza.

La tecnica è stata utilizzata per ricostruire gli ammassi in diverse configurazioni sperimentali. Sono stati utilizzati materiali granulari diversi per forma e densità (materiale ricavato da zeolite sintetica e ghiaia di cava di diverso diametro), che presentano diverse proprietà reologiche, descritte in termini di angolo di attrito Coulombiano tra la superficie di scorrimento e il materiale granulare. Quest'ultimo è stato determinato attraverso l'uso di una scatola di taglio realizzata allo scopo. Il materiale granulare è stato rilasciato lungo la canaletta, simulando situazioni di pendio aperto e di pendio incanalato, libero di espandersi in zona di arresto o condizionato dalla presenza di un deviatore di flusso.

Nei vari casi, la analisi fotogrammetrica è stata effettuata sulla base di otto fotogrammi rilevati alla frequenza di 15 Hz. Le otto videocamere sono state collocate su una struttura di supporto, al di sopra della canaletta, in modo da poter rilevare, in ogni istante di tempo, l'ammasso granulare in tutta la sua estensione.

A tale scopo sono stati affrontati vari problemi di natura sperimentale: il posizionamento delle otto videocamere, tenendo conto della diversa lunghezza focale delle ottiche, ai fini di una corretta sovrapposizione dei fotogrammi; il corretto posizionamento di un numero adeguato di punti di controllo a terra (GCP), allo scopo di dare elevata qualità alle elaborazioni fotogrammetriche; la contemporaneità dell'istante di scatto delle diverse videocamere, mediante un software realizzato in Labview per l'invio contemporaneo di un segnale analogico di scatto alle otto videocamere; il contenimento del tempo di apertura del diaframma delle videocamere fino al valore di 0.0003 s, mediante l'utilizzo di sorgenti luminose di potenza adeguata ed elevata frequenza di emissione degli impulsi di luce; la trasmissione e il salvataggio, in tempo reale, di circa 3Gb/s, mediante l'utilizzo di otto hard-disk gestiti con metodologia Raid0.

Le elaborazioni fotogrammetriche sono state eseguite mediante l'utilizzo di due diversi software commerciali complementari tra loro: l'uno (Australis), ad elevato grado di interattività, più adatto alla determinazione delle proprietà ottiche delle videocamere e alla descrizione di precisione della superficie di scorrimento, l'altro (Agisoft Photoscan), ad elevato grado di automatizzazione nel riconoscimento di un elevato numero di punti contemporaneamente presenti nei diversi fotogrammi, più adatto alla elaborazione delle fasi della dinamica del moto.

Per ogni test di laboratorio le elaborazioni fotogrammetriche permettono di determinare,

per ogni istante di tempo, un dtm descrittivo della distribuzione dell'ammasso granulare e quindi, mediante tecnologie GIS, sono possibili varie applicazioni, come il calcolo del volume. La determinazione del volume occupato dall'ammasso granulare ai diversi istanti di tempo fornisce informazioni sul comportamento dilatante o contraente nel tempo del materiale in movimento.

In alcune configurazioni sperimentali è stato applicato un modello particellare tridimensionale, in fase di sviluppo e taratura. Nella configurazione su pendio orizzontale il confronto è stato eseguito dando ad un ammasso di materiale zeolitico la forma iniziale di un tronco-cono con angolo d'inclinazione di 40° e di 50° . Nella configurazione sul doppio piano inclinato il confronto è stato realizzato utilizzando un volume iniziale ancora tronco-conico con ghiaia grossa e con materiale zeolitico.

Il modello numerico particellare descrive il comportamento dell'ammasso valutando il moto delle singole particelle costituenti, e supposte in movimento sulla superficie di scorrimento, con la seconda equazione della dinamica. Nell'equazione di equilibrio delle forze si tiene conto dell'attrito sul fondo, delle forze aerodinamiche e della gravità. La massa, scomposta nelle particelle costituenti, viene rigenerata come ammasso ad intervalli di tempo stabiliti.

I parametri fisici utilizzati nel modello numerico sono stati determinati sperimentalmente in laboratorio. I risultati ottenuti con materiale zeolitico nelle prove su pendio orizzontale hanno mostrato buona aderenza ai risultati sperimentali. Nel test con materiale zeolitico su canaletta i risultati, pur non mostrando la qualità ottenuta nelle prove su piano orizzontale, si devono comunque ritenere soddisfacenti, anche in considerazione della attuale fase iniziale di verifica del modello. Nel caso invece di simulazione dell'ammasso granulare costituito da ghiaia grossa, per la quale l'angolo di attrito al fondo (31°) è maggiore della inclinazione del piano sperimentale (27.75°), il modello non descrive correttamente la dinamica osservata in laboratorio dove l'ipotesi di reologia dipendente soprattutto dall'attrito al fondo non appare aderente alla realtà.

Bibliografia

- [1] **A. Ghetti.** *Idraulica* 1987, Edizioni Libreria Cortina, Padova.
- [2] **Australia, P.** 2011, *User Manual for Australis*.
- [3] **Iverson R.M.,** The physics of debris flows,1997,U.S. Geological Survey, Cascades Volcano Observatory, Vancouver, Wa
- [4] **D.Dallavalle** 2014 Flussi granulari in laboratorio e sul campo: rilievo 3- dimensionale dinamico mediante tecniche fotogrammetriche terrestri. Università degli studi di Padova
- [5] **D'Accordi** 1999. Master's thesis Università degli studi di Trento
- [6] **Fraser, C., and Fabio Remondino.** 2006. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **XXXVI** (5):266-272.
- [7] **of Civil Engineers U.S. Army Corps of Engineers Staff, A. S.** 1966 *Photogrammetric Mapping*. Asce Publications. Estratto da: <http://books.google.it/books>.
- [8] **S.D'Amelio M.B.** 2007. Technical report Dipartimento di Rappresentazione, Università di Palermo Viale delle Scienze,90128 Palermo
- [9] **Selvini, A.**1994. *Elementi di fotogrammetria*. Città Studi.
- [10] **Vettorazzi , M.** 2004-2005. *Rilievo Fotogrammetrico Da Terra Di Trattati di Corsi D acqua a Forte Pendenza*. PhD thesis Università degli studi di Trento

