

Flussi granulari in laboratorio e sul campo: rilievo
3-dimensionale dinamico mediante tecniche
fotogrammetriche terrestri.

Daniele Dallavalle Università degli Studi di Padova
Scuola di Dottorato in Scienze della Terra

2014

Indice

Abstract	xvii
1 Introduzione	1
2 La fotogrammetria	5
2.1 Introduzione	5
2.2 La fotogrammetria digitale	5
2.3 Fondamenti di ottica geometrica	6
2.4 Orientamento esterno	14
2.4.1 Le equazioni di collinearità	15
2.4.2 Orientamento esterno di un singolo fotogramma (space resection)	15
2.4.3 Orientamento combinato di una coppia di immagini	16
2.4.4 La matrice di rotazione	18
2.5 Bundle Block Adjustment	20
2.5.1 Least square adjustment (metodo ai minimi quadrati)	20
2.6 Calibrazione di camere digitali (self-calibration)	22
2.6.1 Fondamenti analitici	22
2.6.2 Ottimizzazione del self-calibration bundle adjustment	23
2.6.3 I parametri addizionali (AP)	23
2.7 La fotogrammetria terrestre per la modellazione 3D	24
2.8 Conclusioni	25
3 La configurazione sperimentale	27
3.1 Introduzione	27
3.2 Il sistema fisico	28
3.2.1 I coni di rallentamento	29
3.2.2 Il deviatore di flusso	29
3.2.3 Materiali granulari impiegati nei test	29
3.3 Il sistema di acquisizione	35
3.3.1 La sincronizzazione dei frames	38
3.4 Le videocamere Ace GigE Basler	39
3.4.1 Specifiche delle videocamere	39
3.4.2 Le ottiche	41
3.5 Conclusioni	45

4	Metodologie di laboratorio	47
4.1	Introduzione	47
4.2	La calibrazione delle videocamere	47
4.2.1	La calibrazione di sistemi off-line	48
4.2.2	I risultati della calibrazione	52
4.3	La restituzione fotogrammetrica dei piani di base	53
4.3.1	Il settaggio della scala	54
4.3.2	L'assegnazione del sistema di coordinate XYZ	56
4.4	Valutazione di qualità e sommario dei risultati	56
4.5	L'elaborazione del sistema fisico	59
4.6	Ricostruzione multi-image 3D con Photoscan	60
4.6.1	Generazione del modello 3D	60
4.7	Elaborazione fotogrammetrica completa	63
4.8	Conclusioni	64
5	Attività di laboratorio	65
5.1	Introduzione	65
5.2	Precisione delle misure	65
5.2.1	Materiale granulare zeolitico	68
5.2.2	Materiale granulare grossolano	73
5.3	Flusso ghiaioso in pendio aperto (Test 1)	75
5.3.1	Analisi fotogrammetrica dei frames	75
5.3.2	Evoluzione nel tempo	77
5.4	Flusso zeolitico in pendio aperto (Test 2)	81
5.4.1	Analisi fotogrammetrica dei frames	81
5.4.2	L'evoluzione nel tempo	83
5.5	Effetto del flusso della ghiaia su un deviatore (Test 3)	86
5.5.1	Analisi fotogrammetrica dei frames	86
5.5.2	L'evoluzione nel tempo	88
5.6	Effetto del flusso zeolitico su un deviatore (Test 4)	92
5.6.1	Analisi fotogrammetrica dei frames	92
5.6.2	L'evoluzione nel tempo	92
5.7	Conclusioni	97
6	Accuratezza dei test fotogrammetrici	99
6.1	L'errore residuo globale (RMSE)	100
7	Debris flow: aspetti reologici ed idrologici	105
7.1	Introduzione	105
7.2	I modelli reologici tradizionali	105
7.2.1	Il modello di viscoplastico	106
7.2.2	Reologia della fase granulare	110
7.3	Classificazione dei debris flow	112
7.4	Aspetti generali di un debris flow	113
7.4.1	Condizioni idrologiche d'innescio	115

8	Il sistema di monitoraggio	117
8.1	Inquadramento generale	117
8.2	Cenni storici	117
8.2.1	Il primo sistema di monitoraggio, 1997	118
8.2.2	Il secondo sistema di monitoraggio, 2000	120
8.3	L'ultimo sistema di monitoraggio, 2010	121
8.4	Conclusioni	125
9	L'attività del bacino di Acquabona: dati rilevati	127
9.1	Introduzione	127
9.2	Il debris flow del 12 maggio 2012	127
9.3	Il debris flow del 21 luglio 2012	131
9.4	Il debris flow del 31 agosto 2012	135
9.5	Analisi idrologica delle precipitazioni	137
9.5.1	L'evento piovoso del 17-19 settembre 2011	138
9.6	Discussione e Conclusioni	139
10	Conclusioni	145

Elenco delle figure

1.1	Esempio di fenomeni trifasico (debris flow) e bifasico (valanga di neve densa a comportamento granulare).	1
1.2	Carta di pericolo in un conoide detritico del Trentino Alto Adige, secondo una pericolosità bassa (giallo), media (blu), elevata (rosso). Nell'area compresa all'interno del conoide si considera una pericolosità residua. La carta di pericolo è il risultato di studi effettuati con diverso grado di approfondimento come ad esempio analisi di bacino, geologiche, idrogeologiche, idrauliche e sedimentologiche. Il confronto tra le 2 figure evidenzia le diversità, seppur lievi, nella determinazione delle aree a diverse pericolosità, al variare del tempo di ritorno (Fait, 2010).	2
1.3	Esempio di test sperimentale raffigurante lo scorrimento di materiale zeolitico allo sbocco del tratto di scorrimento incanalato in corrispondenza del cambio di pendenza.	4
2.1	Esempio di CCD a 10,2 Megapixel.	6
2.2	Caratteristiche geometriche delle lenti.	7
2.3	Formazione delle immagini nelle lenti positive.	8
2.4	Rifrazione del raggio luminoso.	10
2.5	Schema di formazione dell'immagine per una lente rappresentata dai suoi punti nodali.	10
2.6	Punto principale di autocollimazione e distanza principale.	11
2.7	Deviazione del centro dell'asse ottico dalla congiungente delle marche fiduciali, sul piano dell'immagine.	12
2.8	Distorsione radiale e tangenziale delle lenti [23].	13
2.9	Definizione dei parametri di orientazione esterna [23].	14
2.10	Condizione di complanarità.	17
2.11	Definizione delle 3 rotazioni attorno agli assi di riferimento. www.geodetic.com	18
2.12	Visualizzazione grafica degli angoli τ, ρ, ψ ottenuti dalle rotazioni attorno all'asse x (elevation), y (azimuth), z (roll) rispettivamente. Il software Australis considera come elevation l'angolo $(90^\circ - \tau)$	19
3.1	L'apparato sperimentale utilizzato nelle prove.	27
3.2	Clisimetri appositamente architettati per il posizionamento dei piani di monte e valle alla corretta inclinazione.	28
3.3	Lo scorrimento canalizzato in corrispondenza del piano di monte viene permesso dalla predisposizione delle 2 sponde laterali. Il rilascio del materiale viene permesso dal sollevamento della paratoia innestata tra le sponde. . .	28

3.4	Conoidi in nylon per la riproduzione in scala di modello, da applicare rispettivamente su piani inclinati di 30 gradi (rosso), 27 gradi (arancio), e 24 gradi (giallo) rispetto all'orizzontale.	29
3.5	Deviatore di flusso.	30
3.6	Materiale granulare grossolano.	31
3.7	Apparato sperimentale per la determinazione dell'angolo d'attrito tra il materiale e la canaletta.	32
3.8	Curva caratterizzante il materiale granulare.	33
3.9	Andamento dell'angolo d'attrito medio calcolato per step di carico successivi.	33
3.10	Angolo d'attrito dinamico (a sinistra) e di natural declivio (a destra), determinati in seguito a variazione dell'inclinazione del piano di base, effettuata grazie all'innalzamento graduale del pistone idraulico.	34
3.11	Profilo longitudinale dell'ammasso granulare durante le prove per determinare l'angolo di natural declivio e l'angolo d'attrito dinamico.	35
3.12	Zeolite sintetica.	35
3.13	Materiale in PVC bianco per favorire la restituzione fotogrammetrica.	36
3.14	Interfaccia grafico di controllo per l'acquisizione delle immagini, scritto in Labview.	37
3.15	Sincronizzazione delle videocamere ad un generico istante di tempo t	38
3.16	Metodologia di verifica per il controllo della corretta sincronizzazione dei frames.	39
3.17	Videocamera Ace GigE Basler utilizzata nelle sperimentazioni.	40
3.18	Specifiche delle camere Basler acA 1600-20 gm/gc.	41
3.19	Il tempo di esposizione regola la nitidezza dell'immagine. La nitidezza aumenta al diminuire del tempo di esposizione. In figura il tempo di esposizione utilizzato è 0.1s, 0.06s, 0.01s, 0.003s.	44
4.1	Step operativi per sistemi off-line e on-line.	48
4.2	Piano di monte con sponde laterali di contenimento. I marker retroriflettenti sono utili per la calibrazione e per il settaggio della scala. I Control Point distribuiti sulla superficie definiscono tridimensionalmente entrambi i piani.	49
4.3	Parametri di distorsione di una delle 8 videocamere utilizzate.	51
4.4	Esempio di valutazione della distorsione radiale e tangenziale in pixel effettuata dal software Agisoft per una delle videocamere utilizzate nella attività di laboratorio.	52
4.5	Curve di distorsione radiale calcolate per le 8 videocamere impiegate nei test sperimentali.	53
4.6	Punti esportati nel software Arcmap per la ricostruzione 3D dell'apparato sperimentale.	54
4.7	Esempio di target autoriflettente e disposizione dei punti di riconoscimento.	55
4.8	I coded target e le distanze tra i GCP sono i riferimenti per scalare correttamente il sistema fisico costituito dal piano di monte e dal piano di valle. Per garantire una separazione netta tra i 2 piani si è optato per l'individuazione di una serie di punti in corrispondenza del cambio di pendenza.	55

4.9	La restituzione fotogrammetrica delle 2 sponde laterali di contenimento del flusso, posizionate sul piano di monte, sono state ottenute posizionando dei tie points, riconoscibili nelle immagini, sugli spessori superiori. Il collegamento con il piano di base è stato completato con tecniche GIS. . . .	57
4.10	Alcuni parametri di valutazione dell'accuratezza nella misura dei punti utilizzati per definire la base fisica sulla quale verranno effettuati i test sperimentali. La videocamera utilizzata è una Canon Power Shot 1 a 8 megapixel.	57
4.11	Alcuni parametri di valutazione dell'accuratezza dei punti che andranno poi a costituire la base fisica sulla quale verranno effettuati i test sperimentali.	58
4.12	Le 4 configurazioni del sistema sperimentale dove si sono svolti i test sperimentali: pendio aperto, flusso incanalato, flusso incanalato con utilizzo di cono di rallentamento, flusso incanalato con deviatore ruotato di 25 gradi e inclinato di 45 gradi. Il piano di monte è stato posto ad un'inclinazione di 27.5 gradi sull'orizzontale, il piano di valle di 6.5 gradi. Per le prove sperimentali si utilizzano 2 materiali granulari con diverse caratteristiche reologico-attributive, di forma e distribuzione granulometrica.	59
4.13	Le 8 videocamere presentano caratteristiche ottiche diverse l'una dall'altra, anche in termini di lunghezza focale. La calibrazione dei parametri di orientamento interno ottenuta con Australis, consente l'allineamento delle videocamere utilizzate e agganciate alla struttura di supporto posta al di sopra del sistema fisico.	61
4.14	L'opzione mask consente di considerare soltanto l'area occupata dal materiale, garantendo un minor dispendio in termini di tempo e migliorando la qualità della fase di elaborazione GIS.	62
4.15	L'opzione align photos in Photoscan individua un certo numero di punti sulla superficie del materiale, funzione del contrasto di colori, dell'accuratezza della calibrazione delle videocamere, e del numero di immagini che riprendono una determinata area.	63
4.16	Schematizzazione delle fasi che portano alla descrizione topografica superficiale delle componenti sistema fisico + materiale granulare. In figura viene mostrato un preciso istante di tempo del materiale in movimento.	64
5.1	Posizionamento delle 2 videocamere in zona di scorrimento del materiale a distanza di circa 50 cm l'una dall'altra.	66
5.2	Significato grafico che descrive l'errore di parallasse in fotogrammetria. . . .	67
5.3	Posizionamento delle sezioni di controllo e verifica.	67
5.4	Sistema di riferimento sul piano di valle della sistema sperimentale.	68
5.5	Valori di altezza relativi alla sezione di monte (figura in alto) e di valle (figura in basso).	69
5.6	Andamento dei profili riferiti alla sezione di monte, utilizzando un diverso numero di videocamere. In a) vengono mostrati i profili risultanti dall'utilizzo della funzione 'optimize' e dalla rimozione degli errori non lineari. In b), l'accuratezza inferiore nell'analisi fotogrammetrica inficia l'accuratezza generale, e questo è ben visibile dall'andamento dei profili.	71

5.7	Andamento dei profili riferiti alla sezione di valle, utilizzando un diverso numero di videocamere. In a) vengono mostrati i profili risultanti dall'utilizzo della funzione 'optimize' e dalla rimozione degli errori non lineari. In b), l'accuratezza inferiore nell'analisi fotogrammetrica inficia l'accuratezza generale, e questo è ben visibile dall'andamento dei profili.	72
5.8	In figura è rappresentata la sezione A - A di monte spalmata sull'ortofoto ottenuta fotogrammetricamente. Nel riquadro rosso è visualizzata l'area che viene posta a confronto con il valore d'altezza letto sull'etichetta graduata. I punti rappresentano la nuvola fornita in output dal software fotogrammetrico. La densità di punti può ritenersi rappresentativa per la definizione topografica dell'ammasso granulare.	73
5.9	In a) figura relativa all'altezza del materiale in corrispondenza della sezione di monte, in b) l'altezza in corrispondenza della sezione di valle.	74
5.10	Andamento topografico dei profili riferiti alla sezione di monte ricavati fotogrammetricamente utilizzando un numero decrescente di videocamere.	76
5.11	Andamento topografico dei profili riferiti alla sezione di valle ricavati fotogrammetricamente utilizzando un numero decrescente di videocamere.	76
5.12	Configurazione di partenza per gli esperimenti 1 e 2 su pendio aperto. Il sollevamento della forma di contenimento del materiale avviene in modo manuale.	77
5.13	Area di sovrapposizione delle immagini plottata sui piani della canaletta sperimentale.	78
5.14	Evoluzione tridimensionale dei DTM negli istanti analizzati fotogrammetricamente.	79
5.15	Sezioni longitudinali che mostrano l'evoluzione nel tempo del fronte e della coda dell'ammasso granulare.	80
5.16	Volume occupato dall'ammasso nel tempo. Ad una iniziale piccola dilatazione segue una prolungata fase di contrazione del volume. Prima della stabilizzazione finale si registra un leggero recupero.	81
5.17	Sezione longitudinale riferita alla Figura 5.15, del piano a valle di rallentamento e deposito. L'evoluzione della forma nello spazio e nel tempo evidenzia come il materiale granulare grossolano evolva da una forma a pera (Figura 5.14), ad una configurazione trilobata del deposito finale. Questo è dovuto ad un precoce arresto dei lobi laterali rispetto al lobo centrale. L'arresto del lobo centrale avviene circa 0.5 s in ritardo. Nella sequenza si può notare un avanzamento del corpo centrale che si protrae verso valle, a dispetto dei corpi periferici già stabilizzati. Negli istanti finali il deposito risulta ormai stabile, mentre il materiale residuo in coda forma un piccolo accumulo secondario.	82
5.18	Area di sovrapposizione delle immagini plottata sui piani della canaletta sperimentale.	84
5.19	Evoluzione tridimensionale dei DTM negli istanti analizzati fotogrammetricamente.	85
5.20	Particolare della fase deposizionale riferita al Test 2. L'equidistanda tra le isoipse è di 5 mm.	86

5.21	Volume occupato dall'ammasso nel tempo. Ad una fase iniziale di dilatazione segue una fase di contrazione del volume. Prima della stabilizzazione finale si registra un recupero.	87
5.22	I grafici mostrano il valore puntuale delle velocità preso come riferimento centrale dell'intervallo nel quale è stata calcolata. Lo stesso è stato fatto per le accelerazioni.	88
5.23	Sovrapposizione delle immagini sulla canaletta sperimentale. La configurazione rimane inalterata rispetto al Test 1.	89
5.24	Evoluzione tridimensionale dei <i>DTM</i> nella fase centrale e finale del moto. .	90
5.25	Il grafico visualizza la variazione dell'area sottesa alle 3 sezioni di interesse. Si possono trarre così delle informazioni sul comportamento del materiale e sulle tempistiche deposizionali.	91
5.26	Volume occupato dall'ammasso nel tempo. Ad una iniziale piccola dilatazione segue una prolungata fase di contrazione del volume. Prima della stabilizzazione finale si registra un leggero recupero.	91
5.27	Volume occupato dall'ammasso nel tempo. Rispetto ai casi precedenti le variazioni risultano di entità inferiore anche se vi è una lieve tendenza alla contrazione nella fase centrale del moto. Non si riscontrano apprezzabili variazioni tra il volume iniziale e finale.	93
5.28	Evoluzione tridimensionale dei <i>DTM</i> negli istanti analizzati fotogrammetricamente.	94
5.29	La figura presenta 3 sezioni sul piano di valle, tracciate trasversalmente rispetto alla direzione del moto, che mostrano l'evoluzione bidimensionale del materiale zeolitico granulare.	95
5.30	Modello digitale del terreno relativo ad un istante iniziale. Le sezione tracciata nella parte frontale del flusso granulare evidenzia un gradiente della superficie libera decrescente avvicinandosi alle pareti laterali. L'attrito di parete gioca verodimilmente un ruolo importante in tal senso.	96
6.1	Differenza (residuo) tra la posizione del GCP (Ground Control Point) fornito dall'utente al software fotogrammetrico e la posizione dello stesso punto calcolata dal software.	99
6.2	La frequenza relativa della variabile Residuo. Il campione di dati è stato costruito considerando tutti i Control Point nelle quindici elaborazioni eseguite. La numerosità del campione è risultata pari a 301.	100
6.3	Valori assunti dai residui nelle 3 componenti x , y e z	101
6.4	Parametri statistici ottenuti per la variabile Residuo dalla analisi di regressione lineare multipla per la valutazione della accuratezza delle elaborazioni fotogrammetriche eseguite nel test con materiale granulare grossolano. . . .	102
6.5	Valori dei Residui forniti in output dall'analisi di regressione lineare multipla. Alcuni Residui hanno valori che si discostano in modo abbastanza evidente dagli altri. Nella presente analisi non si è ritenuto comunque giustificata la loro eliminazione come outliers.	103
7.1	Modelli reologici per diversi tipi di colata.	106

7.2	a) schema delle forze che agiscono sull'equilibrio di un flusso; b) distribuzione dello sforzo di taglio e della velocità per un fluido di Bingham su pendio infinito.	108
7.3	Valori dei parametri per il modello di Herschel e Bulkley (da Major e Pierson, 1992);	109
7.4	Definizione di concentrazione lineare $\lambda = d_p/s$	111
7.5	Classificazione reofisica dei debris flow [Ancy, (1999) e Bardou, (2003)]. . .	113
7.6	Schema di una colata detritica (Pierson, 1986).	114
7.7	Sezione laterale di una colata detritica (Schatzmann, 2005).	114
7.8	Intensità di precipitazione rispetto alla durata dell'evento per alcuni siti di monitoraggio dolomitici.	116
7.9	Intensità di pioggia critica e pioggia cumulata di innesco (Yuan,2005). . . .	116
8.1	DTM relativo al bacino di scorrimento del debris flow, dalla zona di innesco alla zona di deposizione del materiale. L'elaborazione fotogrammetrica che ha portato alla definizione dell'immagine è stata ricavata da immagini aeree del 2006, disponibili sul portale del sito della Regione Veneto. L'andamento irregolare delle curve di livello è causato dalla fitta presenza di vegetazione bassa tipica di zone aride e secche in versante esposto a Sud dove la formazione di suolo è ridotta.	118
8.2	Il sistema di monitoraggio montato sul rio Acquabona nel 1997. Sono indicati la posizione delle 3 stazioni ed i sensori utilizzati (Arattano et alii, 1999).	119
8.3	Il sistema di monitoraggio montato sul rio Acquabona nel 2000. È indicata la posizione delle 3 stazioni. La strumentazione e i principi di funzionamento sono quelli adottati nella precedente installazione (Tecca et alii, 2003). . . .	120
8.4	A sinistra, una immagine della stazione di monte del sistema di monitoraggio 2010 e, a destra, uno schema della strumentazione installata.	121
8.5	In alto, una immagine della stazione di valle del sistema di monitoraggio 2010 e, in basso, uno schema della strumentazione installata.	122
8.6	Stazione meteorologica Vaisala.	123
8.7	Pluviometro a basculante.	124
8.8	La taratura del distanziometro ad ultrasuoni e del distanziometro laser ad inizio e a fine stagione 2011. Il distanziometro ad ultrasuoni ha una curva di taratura traslata.	124
8.9	Sensori laser (colore nero) e ad ultrasuoni (colore blu).	125
9.1	L'occlusione completa dell'imbutto attraverso il quale scorre l'acqua che produrrà poi le basculate è dovuta ad impurità provenienti dalla vegetazione arborea circostante oltre che da insetti.	128
9.2	Le retine a maglie inserite nei 2 punti critici dello strumento hanno la funzione di limitare fortemente l'occlusione dovuta ad impurità.	128

9.3	La pioggia cumulata totale registrata presso la stazione di monte è di 47.35 <i>mm</i> . La prima fase dell'evento perturbato ha una durata di 45' con un'intensità media oraria di 27.96 <i>mm/h</i> (0.466 <i>mm/min</i>). La seconda fase ha una durata di 37' con intensità media oraria di 34.15 <i>mm/h</i> (0.569 <i>mm/min</i>). Le piogge registrate a valle hanno prodotto un accumulo di 8.4 <i>mm</i>	129
9.4	Nella figura in alto è illustrato l'andamento delle piogge elaborato dai dati della stazione meteorologica di monte. In basso, l'andamento della quota rispetto al fondo del canale fornita dal sensore ad ultrasuoni. Secondo la taratura adottata l'altezza massima raggiunta dal flusso nella fase iniziale è di 0.65 <i>m</i>	130
9.5	Le precipitazioni misurate in località Col de La Roa, quota 1100 m.s.l.m. presso San Vito di Cadore. La cumulata totale è di 40 <i>mm</i> . La stazione di misura di Cortina D'Ampezzo, 1230 m.s.l.m., evidenzia un accumulo di 33.8 <i>mm</i>	131
9.6	Andamento topografico puntuale di dettaglio del debris flow ottenuto con il distanziometro laser. Si notano 2 differenti impulsi.	131
9.7	In rosso sono evidenziati i 2 eventi di pioggia che hanno innescato il debris flow del 12 maggio 2012.	132
9.8	Le precipitazioni misurate in località Col de La Roa, quota 1100 m.s.l.m. presso San Vito di Cadore. La cumulata totale è di 40 <i>mm</i> . La stazione di misura di Cortina D'Ampezzo, 1230 m.s.l.m., evidenzia un accumulo di 33.8 <i>mm</i>	133
9.9	Immagine del fronte incanalato del debris flow. L'altezza massima arriva ad 1.5 <i>m</i> dalla base del canale. Sul fondo il passaggio della parte centrale del flusso detriticosotto la stazione di valle del sistema di monitoraggio installato ad Acquabona.	134
9.10	Raffronto molto interessante tra i comportamenti del materiale granulare grossolano in fase di deposito e una condizione simile sul campo presso la stazione di monitoraggio di Acquabona.	135
9.11	a): Condizioni di deflusso superficiale prima del passaggio del debris flow; b) fronte del debris flow; c) corpo centrale del debris flow con deposizione laterale; d) coda viscosa iperconcentrata erosiva delle sponde laterali. . . .	136
9.12	Nell'evento del luglio 2012 la colata si autocrea nel tempo le condizioni per un flusso incanalato. Esternamente rispetto al flusso principale è visibile la presenza più sensibile di materiale granulare di medio-piccola granulometria. In laboratorio, viene riproposta una simulazione di flusso granulare zeolitico in condizioni asciutte.	137
9.13	Evoluzione della quota del fondo, descritta dal distanziometro laser.	137
9.14	Campione di immagini riferite all'evento sopra descritto. L'evoluzione del fondo è rapidamente variabile nel tempo, e caratterizzato dall'insorgere di fenomeni di erosione e deposizione differenziali.	138
9.15	Intensità di precipitazione confrontate nelle 2 stazioni, secondo intervalli di calcolo crescenti.	140
9.16	Relazioni che intercorrono tra durata, l'intensità e il valore cumulativo delle precipitazioni.	141

9.17	Proprieta di pioggia riferite all'evento. La perturbazione è caratterizzata da numerosi impulsi piovosi spalmati in 44 h complessive.	142
9.18	Profilo di quota relativo alla superficie liquida.	142
9.19	Analisi di cross-correlazione tra le intensità di pioggia nei 2 siti di misura. .	143

Elenco delle tabelle

2.1	Valori della distorsione radiale, della focale e delle coordinate del punto principale ottenuti in seguito alla calibrazione della fotocamera Canon PowerShot Pro 1.	13
2.2	Relazioni tra i 2 sistemi di riferimento angolare per 4 diverse fotografie. . .	20
3.1	Pendenza della canaletta e angolo di natural declivio del materiale calcolato durante le prove.	32
3.2	Confronto tra i valori sperimentali determinati sul deposito e i valori calcolati dal modello tridimensionale elaborati dal modello Agisoft Photoscan.	34
3.3	Dalle caratteristiche granulometriche si evince che il materiale bianco sia di dimensioni maggiori e più della metà del campione analizzato sia superiore ai 2 mm.	36
4.1	Distanza focale e posizione del centro della CCD rispetto all'asse ottico per le otto videocamere utilizzate, ottenuti mediante calibrazione con Australis. I parametri sono valutati per le distanze di 2 m e 1.15 m.	52
5.1	Tabella riassuntiva dei dati di altezza in corrispondenza delle 2 sezioni in analisi. Il livello di accuratezza è descritto nella tabella dell'errore residuo RMSE. Si è fatto uso della funzione optimize.	71
5.2	Tabella riassuntiva dei dati di altezza in corrispondenza delle 2 sezioni in analisi. Il livello di accuratezza è descritto nella tabella dell'errore residuo RMSE. Non si è fatto uso della funzione 'optimize'.	72
5.3	Le tabelle mostrano i dati relativi alla fotogrammetria nelle 2 sezioni di misura. L'altezza alla sezione di monte non è qui definibile con precisione, verosimilmente compresa tra 18 mm e 19 mm. L'altezza in corrispondenza della sezione di valle è di 24 mm circa.	75
5.4	Informazioni principali che partecipano alla definizione del DTM dell'ammasso granulare negli istanti di tempo elaborati.	78
5.5	Informazioni principali che definiscono o che partecipano alla definizione del DTM dell'ammasso granulare negli istanti di tempo elaborati.	83
5.6	Informazioni principali che definiscono o che partecipano alla definizione del DTM dell'ammasso granulare negli istanti di tempo elaborati.	87
5.7	Informazioni principali che definiscono o che partecipano alla definizione del DTM dell'ammasso granulare negli istanti di tempo elaborati.	92

Abstract

The topic about which the research was developed is the study of some aspects of the dynamics of granular masses.

The study was conducted simultaneously in the laboratory and in the field.

In the laboratory, the aim was to investigate the experimental photogrammetric surveying techniques, with a view to their application in the field and in favor of a use for the calibration of mathematical and numerical dynamic models.

In the field, the goal was to give continuity to the research activity at a debris flows dolomite site, already studied in the recent past, and to evolve the techniques of field observation, in order to consolidate the fundamental ideas on the physical manifestations of the phenomena.

In the laboratory, low cost photogrammetric techniques have been used in a dynamic way to describe the evolution of the surface of a moving granular mass, in order to contribute to a better understanding of its rheological behavior.

The experimental apparatus consisted of two square-shaped planes, hinged on one side. The length of the side was equal to 1.5 m, the inclination of the upstream plane was 27.5° , the inclination of the downstream plane was 6.5° .

Above the channel eight digital camcorders were arranged that could take the phenomenon in evolution, at the frequency of 20 frames per second. An acquisition system was associated capable of storing the considerable data stream generated.

The results obtained by the photogrammetric calculations, showed the adequacy of the designed physical apparatus, the potential and limitations of the used technique, especially related to the amount of required processing, also due to the need of different photogrammetric softwares.

The field work was carried out at the debris flows site of Acquabona (Cortina d'Ampezzo, BL, Italy).

The debris flow events are among the most dangerous events in the Italian Alps. For this reason, many researchers have conducted numerous studies in order to analyze their rheological characteristics of initiation, propagation and stopping.

In the site of Acquabona events occur almost every year, as a result of the availability of a large amount of material, connected to the continuous erosion of the channel sides, the topographic characteristics of the site and the presence of suitable rain events, in particular summer rainstorms.

The new monitoring system is composed of an upstream meteorological station, placed in the most apical area of triggering, and a downstream station, located in the area next to the stopping zone, where, besides another weather station, sensors were installed to measure the dynamic characteristics of the advancing debris flow (distance meters, video cameras).

The monitoring system is controlled by the Department of Geosciences, University of Padova, thanks to the local availability of the 3G UMTS network.

The developed activity has allowed us to highlight the difficulty of defining the hydrological parameters related to debris flow events and to describe the morphodynamic details of some events.

L'argomento attorno al quale è stata sviluppata la ricerca è lo studio di alcuni aspetti della dinamica degli ammassi granulari.

Lo studio è stato affrontato contemporaneamente in laboratorio e sul campo.

In laboratorio l'obiettivo è stato quello di approfondire le tecniche di rilievo sperimentali fotogrammetriche, in vista di una loro applicazione sul campo e a favore di un utilizzo per la taratura di modelli matematico-numeric.

Sul campo ci si è posti l'obiettivo di dare continuità all'attività di ricerca presso un sito dolomitico da colate di detriti già oggetto di studio nel recente passato e di evolvere le tecniche di osservazione di campo, fondamentali per consolidare le idee sulle manifestazioni fisiche dei fenomeni richiamati.

In laboratorio sono state utilizzate tecniche fotogrammetriche a basso costo in forma dinamica per descrivere l'evoluzione superficiale di un ammasso granulare in movimento, al fine di contribuire ad una migliore comprensione del comportamento reologico.

L'apparato sperimentale era costituito da due piani di forma quadrata, incernierati su un lato. La lunghezza del lato era pari a 1.5 m, la inclinazione del piano di monte era di 27.5° , del piano di valle di 6.5° .

Sopra la canaletta sono state disposte otto videocamere digitali che potevano riprendere, alla frequenza di 20 frames al secondo, il fenomeno in evoluzione, collegate con un sistema di acquisizione in grado di memorizzare il notevole flusso di dati generato.

I risultati ottenuti dalle elaborazioni fotogrammetriche hanno mostrato l'adeguatezza della progettazione effettuata, le potenzialità della tecnica utilizzata ed i limiti, legati soprattutto alla mole delle elaborazioni necessarie, dovute anche alla necessità dell'utilizzo di diversi software fotogrammetrici.

L'attività di campo si è svolta presso il sito da colate di detriti di Acquabona (Cortina D'Ampezzo, BL, Italia).

Gli eventi da debris flow sono tra gli eventi più pericolosi nelle Alpi italiane e non solo. Per questa ragione, molti ricercatori hanno condotto numerose analisi per lo studio delle caratteristiche reologiche di innesco, di propagazione e arresto.

Nel sito di Acquabona gli eventi si presentano a cadenza quasi annuale a conseguenza della disponibilità di una grande quantità di materiale, connessa alla continua erosione delle sponde laterali del canale, delle caratteristiche topografiche del sito e della presenza di eventi di pioggia adatti, in particolare eventi temporaleschi estivi.

Il sistema di monitoraggio, di nuova progettazione, è composto da una stazione meteorologica di monte, posizionata nella zona di innesco più apicale delle colate, e di una stazione di valle, posizionata in zona prossima alla zona di arresto, dove, accanto ad un'altra stazione meteorologica, sono stati installati sensori per la misura delle caratteristiche dinamiche delle colate in avanzamento (distanziometri, videocamere).

Il sistema di monitoraggio è controllato dal Dipartimento di Geoscienze dell'Università di Padova, grazie alla disponibilità locale della rete 3G UMTS.

L'attività svolta ha permesso di mettere in evidenza la difficoltà di definire i parametri pluviometrici correlati agli eventi di colata e di descrivere i dettagli morfodinamici di alcuni eventi di colata.

Capitolo 1

Introduzione

Con il lavoro di tesi sono stati analizzati numerosi aspetti di fenomeni granulari naturali, fenomeni trifasici come le colate di detriti e bifasici come le valanghe di neve densa (Figura 1.1), sia dal punto di vista sperimentale in laboratorio, che dal punto di vista dell'osservazione di campo.

Il tema è rilevante, in considerazione delle condizioni di pericolo a cui sono soggette vaste aree densamente popolate delle zone alpine e appenniniche. Uno sforzo significativo è attualmente volto alla determinazione delle carte di pericolosità sia per quanto riguarda le valanghe di neve che per quanto riguarda le colate detritiche e altri fenomeni naturali. La presenza di numerosi centri abitati in prossimità di conoidi detritici o alluvionali in ambiente alpino aumenta notevolmente il rischio associato ad eventi naturali sia in termini di perdite di vite umane che di vulnerabilità degli elementi funzione della loro esposizione (Figura 1.2).



Figura 1.1: Esempio di fenomeni trifasico (debris flow) e bifasico (valanga di neve densa a comportamento granulare).

Si procede quindi nella ricerca finalizzata alla definizione di modelli numerici più affidabili di quelli attualmente in commercio, che possano con minor grado di incertezza delimitare aree a rischio elevato, da aree a rischio moderato o leggero e poter quindi ove necessario predisporre strutture di difesa e prevenzione adeguate. La calibrazione di tali modelli è eseguita mediante la riproduzione su scala di modello dei fenomeni reali.

L'obiettivo è stato quello di approfondire le tecniche di rilievo sperimentali a favore di un utilizzo per la taratura dei modelli matematico-numerici e in parallelo di continuare ad

evolvere le tecniche di osservazione di campo, fondamentali per consolidare le idee sulle manifestazioni fisiche dei fenomeni richiamati. L'obiettivo del lavoro di laboratorio sarà lo sviluppo di una tecnica fotogrammetrica a basso costo che possa consentire la riproduzione tridimensionale di un certo numero di test sperimentali; il lavoro di campo è rivolto all'acquisizione di dati idrologici ed evidenze reologiche da poter associare e confrontare criticamente al lavoro di laboratorio, grazie ad un nuovo sistema di monitoraggio di debris flow recentemente installato.

Nonostante il lavoro di laboratorio sia improntato ad un uso di materiale secco privo di acqua, la volontà è quella di scomporre il fenomeno inteso nella sua complessità, nelle singole componenti. Le colate detritiche presentano nel tempo ma anche nello spazio, dei comportamenti e delle evidenze che lo assimilano in maniera convincente ad un comportamento granulare (ad es nel caso di fronte parzialmente saturo con assenza di matrice), che si alternano a fasi reologiche diverse. La complessità di comprensione e simulazione numerica affidabile dei debris flow sta proprio nella difficoltà di riproporre le variazioni di reologia che si manifestano nello spazio e nel tempo, dovute alle complesse e numerose condizioni al contorno di difficile interpretazione. L'attività di laboratorio, mira a sviluppare una tecnica di ricerca e restituzione che possa chiarire e definire metricamente alcuni aspetti che possono essere correlati a scala di prototipo sia per quanto riguarda eventi bifasici e trifasici.

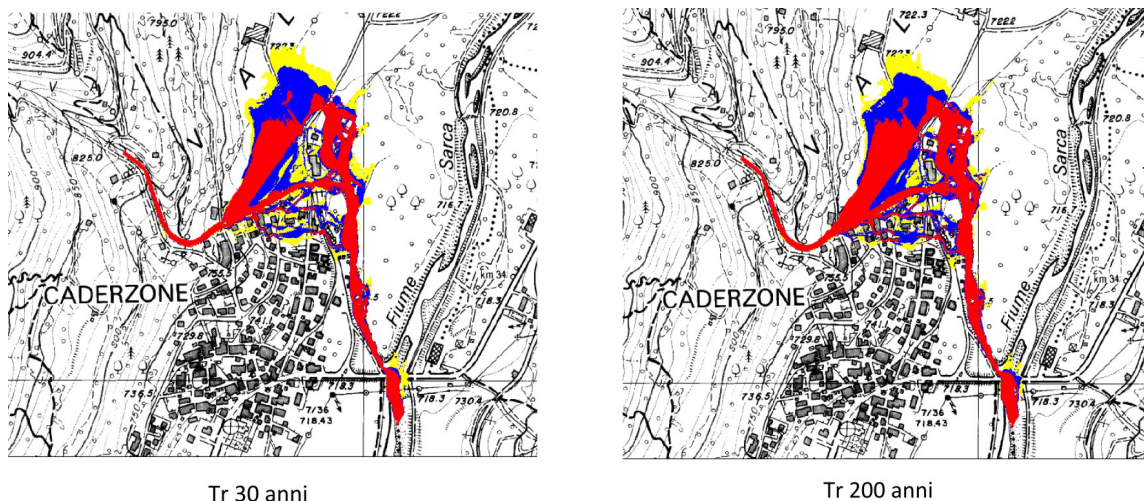


Figura 1.2: Carta di pericolo in un conoide detritico del Trentino Alto Adige, secondo una pericolosità bassa (giallo), media (blu), elevata (rosso). Nell'area compresa all'interno del conoide si considera una pericolosità residua. La carta di pericolo è il risultato di studi effettuati con diverso grado di approfondimento come ad esempio analisi di bacino, geologiche, idrogeologiche, idrauliche e sedimentologiche. Il confronto tra le 2 figure evidenzia le diversità, seppur lievi, nella determinazione delle aree a diverse pericolosità, al variare del tempo di ritorno (Fait, 2010).

In questo lavoro di tesi verrà introdotto il termine di FOTOGRAMMETRIA DINAMICA per l'esecuzione dei test sperimentali e verrà illustrata nel dettaglio la metodologia implementata, associata al margine di incertezza delle restituzioni tridimensionali.

Attualmente la metodologia fotogrammetrica più diffusa e conosciuta quella aerea (remote sensing), tuttavia, da oltre un secolo, la fotogrammetria da terra è la tecnica più usata per risolvere problemi di rilievo in zone molto impervie di montagna special-

mente nelle Alpi; dove, sino al 1920, ha rappresentato l'unico procedimento di rilievo fotogrammetrico impiegato [Astori et al, 1981].

Il sorprendente sviluppo che in questi ultimi anni ha interessato il campo della tecnologia digitale, unito all'utilizzo di appropriati software per la gestione e l'elaborazione delle immagini, ha consentito di raggiungere notevoli miglioramenti nel rilievo da terra e da breve distanza (proximal sensing).

L'introduzione dei Sistemi Informativi Territoriali (SIT) o Geographical Information System (GIS) e in particolare le cartografie digitali, i modelli digitali del terreno e le ortofoto, hanno ulteriormente incentivato il ricorso a questa tecnica, rendendola ancora più agevole e conveniente.

Inoltre si sta cercando sempre più di evitare il lavoro di calibrazione della macchina fotografica, indispensabile per ricavare alcuni parametri da inserire nei programmi come informazione preliminare, prima di procedere con l'elaborazione fotogrammetrica vera e propria. Per questo si sta ancora lavorando alla produzione di software che siano in grado di portare ad una auto-calibrazione che dia valori affidabili, senza dover effettuare una serie di operazioni apposite per la calibrazione della camera. La calibrazione della macchina fotografica sta quindi diventando un processo interno al procedimento fotogrammetrico e non più un lavoro precedente, con un significativo risparmio di tempo. Questo passo porta sicuramente vantaggi anche dal punto di vista economico, considerando che si può tranquillamente rinunciare a delle macchine fotografiche metriche e professionali dotate di certificato di calibrazione.

I fenomeni riprodotti in laboratorio (Figura 1.3), sono di piccole dimensioni con l'intento di verificare i limiti nella applicazione delle tecniche fotogrammetriche, avendo a che fare con depositi anche di pochi millimetri di spessore. I software fotogrammetrici implementati nel presente lavoro sono Australis e Photoscan. e ne verranno valutati i limiti e le peculiarità.

Lo studio parallelo condotto in laboratorio e sul campo consente di avere sempre un riscontro reale dei fenomeni riprodotti a scala di modello e rende il ricercatore consapevole dei limiti e delle condizioni che si pongono in laboratorio; rende inoltre consapevoli delle difficoltà e dell'assiduità nel lavoro di campo necessario per reperire dei dati utili alla ricerca. Ciò che tuttavia si vuole mettere in risalto è che la parte di laboratorio si lega a quella di campo e l'una non può essere svincolata dall'altra per l'acquisizione di critica consapevolezza del fenomeno naturale analizzato.

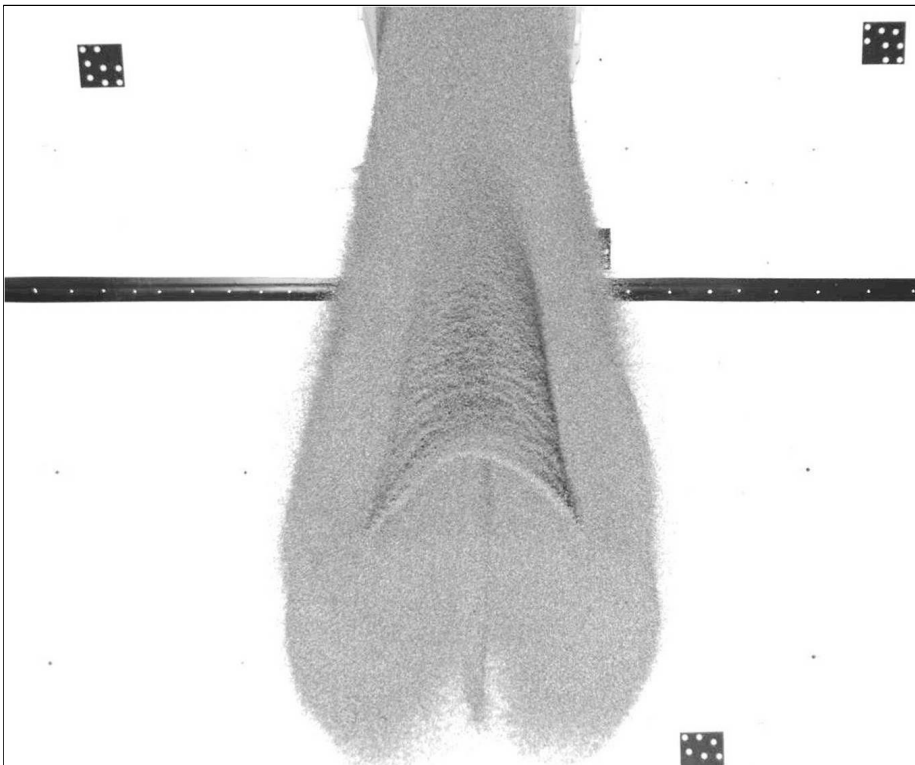


Figura 1.3: Esempio di test sperimentale raffigurante lo scorrimento di materiale zeolitico allo sbocco del tratto di scorrimento incanalato in corrispondenza del cambio di pendenza.

Capitolo 2

La 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'obbiettivo 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 analogi-

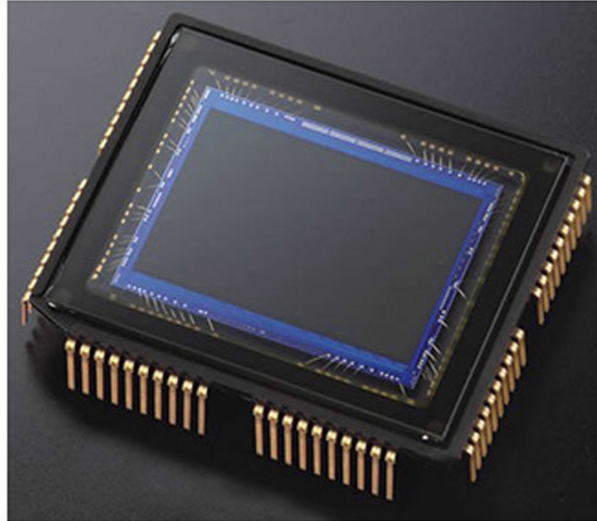


Figura 2.1: Esempio di CCD a 10,2 Megapixel.

co/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.

I sensori raggiungono facilmente risoluzioni enormi, ad esempio 5 milioni di pixel (il massimo è 14 milioni).

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.

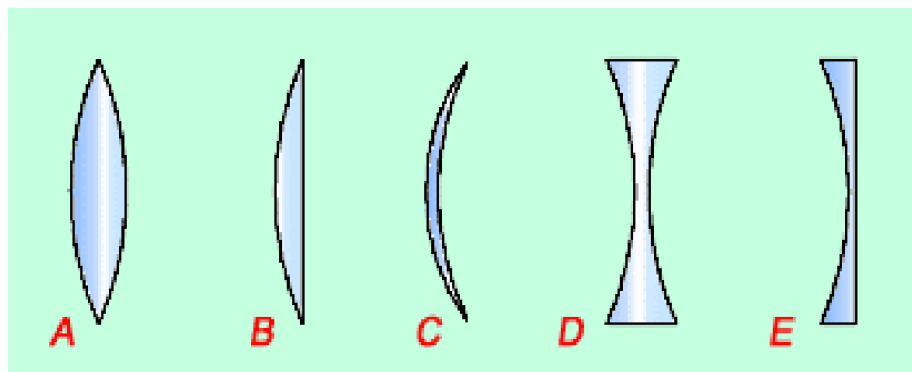


Figura 2.2: Caratteristiche geometriche delle lenti.

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

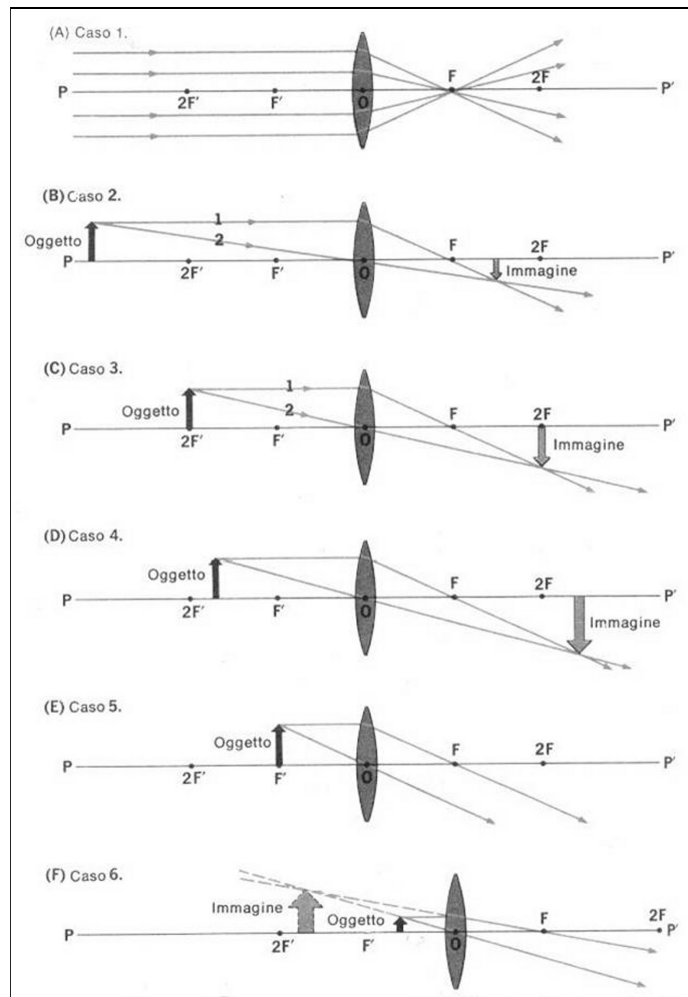


Figura 2.3: Formazione delle immagini nelle lenti positive.

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 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, dritta, 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).

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

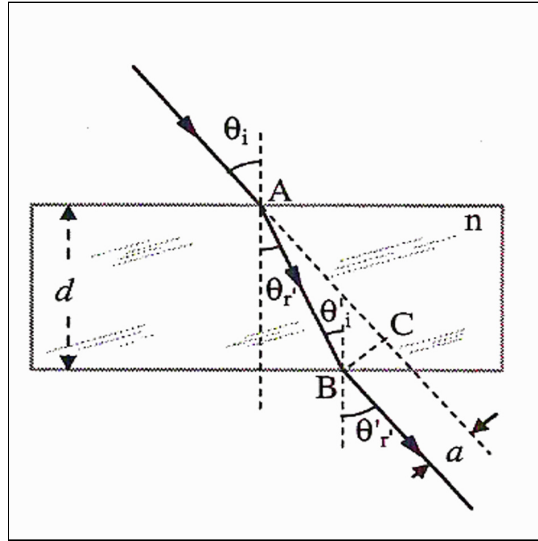


Figura 2.4: Rifrazione del raggio luminoso.

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.

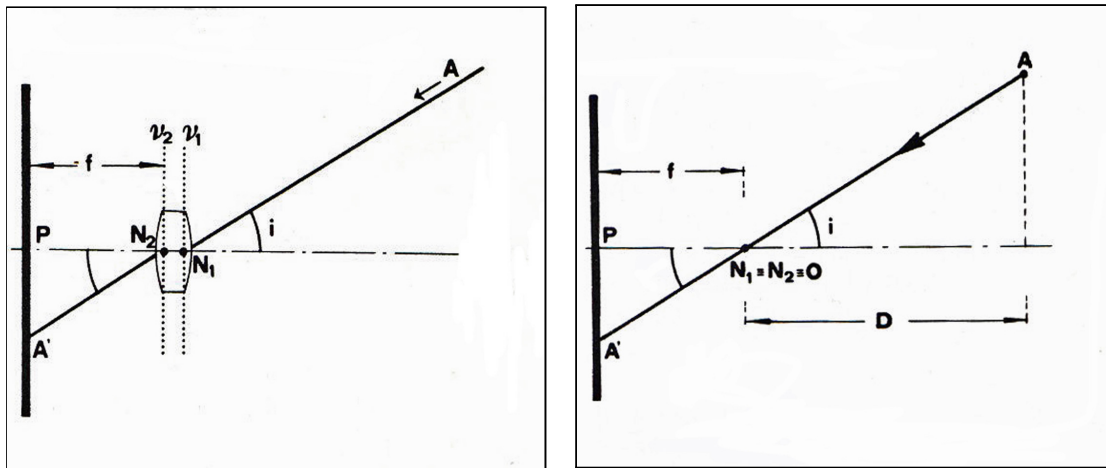


Figura 2.5: Schema di formazione dell'immagine per una lente rappresentata dai suoi punti nodali.

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.

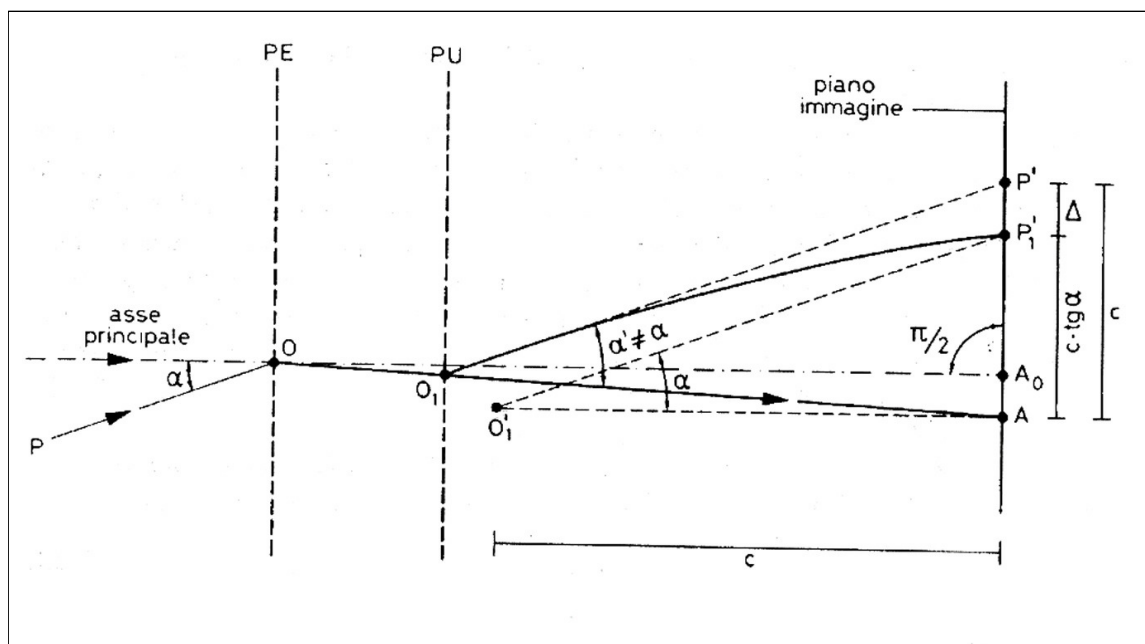


Figura 2.6: Punto principale di autocollimazione e distanza principale.

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_0 , 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 linee congiungenti marche fiduciali opposte determina il centro fiduciale

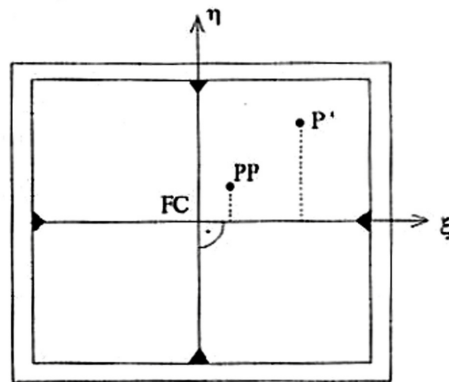


Figura 2.7: Deviazione del centro dell'asse ottico dalla congiungente delle marche fiduciali, sul piano dell'immagine.

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 [38].

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 lungo linee radiali dal punto principale. L'effetto della distorsione radiale è rappresentato come Δr . La distorsione tangenziale delle lenti si trova come angolo destro rispetto alle linee radiali. Nella Figura 2.8 la distorsione tangenziale è rappresentata come Δt . L'effetto della distorsione radiale attraverso un'immagine può essere approssimata attraverso l'utilizzo di un polinomio (eq.2.3). Il seguente polinomio viene utilizzato per il calcolo dei coefficienti associati alla distorsione radiale delle lenti:

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

dove Δr rappresenta la distorsione radiale lungo una distanza radiale r dal punto principale [32].

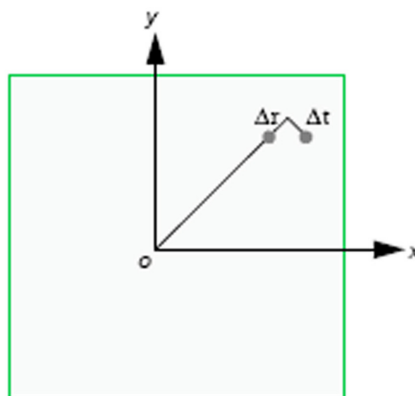


Figura 2.8: Distorsione radiale e tangenziale delle lenti [23].

In Tabella 2.1 sono riportati la distanza focale, le coordinate del punto principale e i parametri di distorsione radiale della fotocamera Canon PowerShot Pro 1, utilizzata nei test sperimentali, ottenuti in seguito alla calibrazione.

Parametri di calibrazione	
Risoluzione	3264x2448
Sensor size	0.0027
c (mm)	7.4564
xp (mm)	-0.2098
yp (mm)	0.0751
k1	3.09E-03
k2	-2.89E-05
k3	-7.33E-08
P1	5.61E-04
P2	-1.14E-04

Tabella 2.1: Valori della distorsione radiale, della focale e delle coordinate del punto principale ottenuti in seguito alla calibrazione della fotocamera Canon PowerShot Pro 1.

Alcuni di questi parametri vengono utilizzati come valori di input da inserire nel software per il processo fotogrammetrico. Le coordinate del punto principale hanno come origine il vertice in alto a destra e dovranno quindi essere corrette e riferite al punto d'incontro delle marche fiduciali.

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.[43].

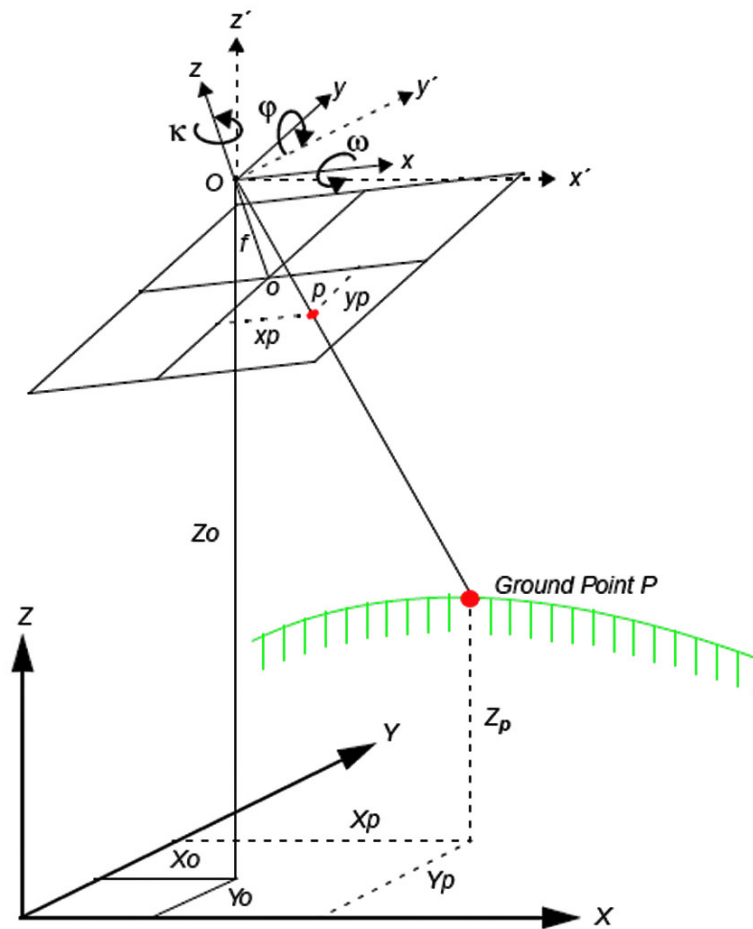


Figura 2.9: Definizione dei parametri di orientazione esterna [23].

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).

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.

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 (vedi app.??). 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) [30].

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. *In realtà le equazioni non possono essere risolte direttamente, vanno invece linearizzate e occorre quindi avere a disposizione valori approssimati delle incognite.* 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) ; per semplicità analizziamo proprio quest'ultima parte per prima.

Orientamento assoluto

Il rapporto tra le coordinate del modello (x^*, y^*, z^*) , e le coordinate oggetto (X, Y, Z) possono essere espresse 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) così :

- 3 equazioni derivanti 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 1GCP con l'altezza, purché quest'ultimo non sia collineare con i 2 precedenti.

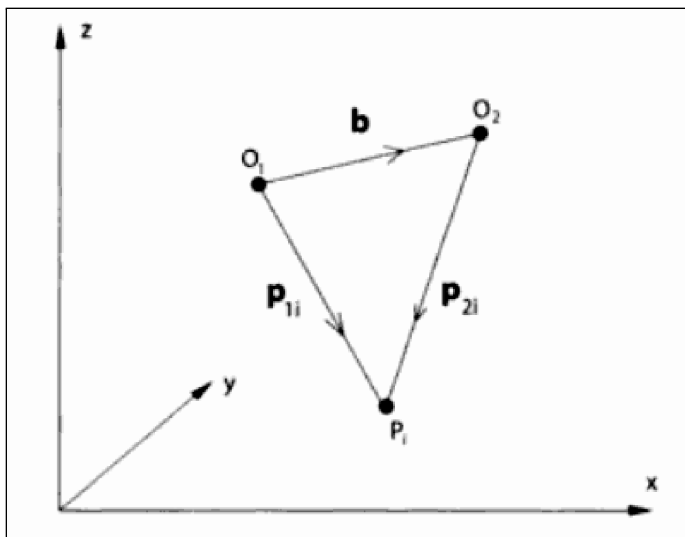


Figura 2.10: Condizione di complanarit .

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. Perci    ragionevole assumere che una condizione necessaria per l'orientamento relativo,   che i raggi omologhi si intersechino da almeno 5 punti ben distribuiti della superficie, e se questo   vero allora tutte le altre coppie di raggi omologhi si intersecheranno. Prende il nome di orientamento relativo proprio perch  vengono determinate soltanto le posizioni e le orientazioni relative di 2 fasci di raggi [39].

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,   composto dal prodotto scalare di uno dei tre vettori con il prodotto vettoriale degli altri 2. Il prodotto vettoriale di due vettori complanari   un vettore perpendicolare al piano determinato dai primi due, se i 3 vettori sono complanari, il loro triplo prodotto scalare   0, poich  il prodotto vettoriale di 2 di questi,   perpendicolare al terzo.

La condizione di complanarit  viene cos  espressa:

$$b^T(p_1 \times p_2) = 0$$

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

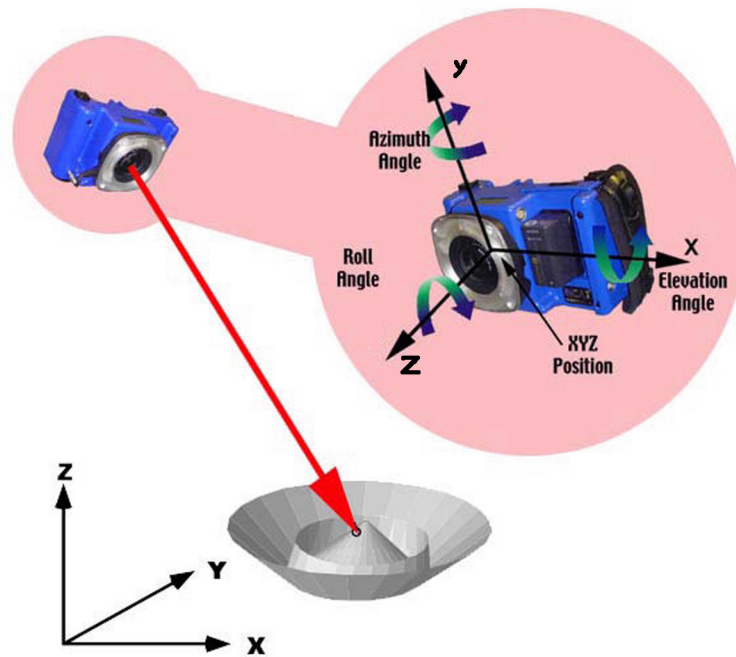


Figura 2.11: Definizione delle 3 rotazioni attorno agli assi di riferimento. www.geodetic.com

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 un'analisi più dettagliata e per vedere come si ricava la matrice di rotazione si rimanda all'appendice ??.

Per le operazioni manuali che generalmente vengono svolte con la macchina fotografica, specialmente quando si parla di fotogrammetria terrestre, risulta più facile da capire e da predire il suo 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 ci si può facilmente ricavare l'altra terna di valori. In termini pratici, si può facilmente risalire ad ω, φ, κ una volta riusciti a misurare sul campo azimuth, elevation e roll.

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.

Sotto viene riportata la matrice di rotazione $[M]$ utilizzata dal programma [42].

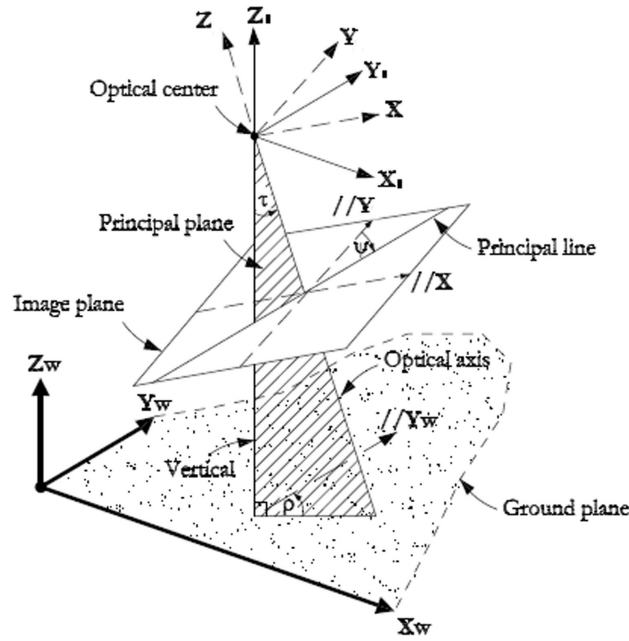


Figura 2.12: Visualizzazione grafica degli angoli τ , ρ , ψ ottenuti dalle rotazioni attorno all'asse x (elevation), y (azimuth), z (roll) rispettivamente. Il software Australis considera come elevation l'angolo $(90^\circ - \tau)$.

$$[M] = \begin{matrix} \cos(az)\cos(roll) + \sin(az)\sin(el)\sin(roll) & \cos(az)\sin(roll) + \sin(az)\sin(el)\cos(roll) & \sin(az)\cos(el) \\ \sin(az)\cos(roll) - \cos(az)\sin(el)\sin(roll) & -\sin(az)\sin(roll) - \cos(az)\sin(el)\cos(roll) & \cos(az) - \cos(el) \\ \cos(el)\sin(roll) & \cos(el)\cos(roll) & -\sin(el) \end{matrix}$$

Matrice di rotazione.

Nella Tabella 2.2 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 2.2: Relazioni tra i 2 sistemi di riferimento angolare per 4 diverse fotografie.

2.5 Bundle Block Adjustment

Quando si hanno a disposizione più immagini la space resection è piuttosto limitativa ed è utile per lo più, come approssimazione iniziale e come passaggio preliminare per i calcoli successivi.

Una "bundled solution" viene elaborata includendo i parametri di orientamento esterno di ogni immagine, così come le X, Y, Z dei tie points e dei control points aggiustati, in un blocco. Un blocco di immagini contenuto in un progetto viene processato in un'unica soluzione, attraverso una tecnica statistica ai minimi quadrati che minimizza e distribuisce l'errore.

2.5.1 Least square adjustment (metodo ai minimi quadrati)

Il "least square adjustment" è una tecnica statistica che viene usata per stimare i parametri incogniti associati ad una soluzione ed allo stesso tempo minimizzarne gli errori.

Più in dettaglio:

- aggiustare i valori di orientamento esterno della macchina fotografica;

- stimare le coordinate X, Y, Z dei tie points;
- stimare o aggiustare i valori di orientamento interno;
- minimizzare e distribuire gli errori sulla rete di osservazioni.

Gli errori sono attribuiti all'inaccuratezza associata all'inserimento delle coordinate dei GCP, alla collocazione imprecisa dei punti sull'immagine nonché alle informazioni sulla 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 differenziazione 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 della 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 (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, 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 amatoriali 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 effetti trascurabili rispetto alla distorsione radiale e pertanto influisce in tono minore sul risultato e sulla precisione finale.

Le procedure 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 [37].

Nelle sperimentazioni descritte in 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 (Figura ??).

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

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 [18].

2.7 La fotogrammetria terrestre per la modellazione 3D

Per molti anni la fotogrammetria ha affrontato il problema riguardante la ricostruzione tridimensionale da immagini. Sebbene siano richieste precise procedure di calibrazione e orientazione, 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 interat-

tivo, 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

La configurazione sperimentale

3.1 Introduzione

L'apparato sperimentale (Figura 3.1), descritto nel seguito nelle sue componenti e funzioni, è finalizzato all'esecuzione di test volti all'approfondimento del comportamento reologico di diverse tipologie di materiale granulare e a fornire dati sperimentali utili alla taratura dei modelli fisico-numericì di simulazione della dinamica degli ammassi granulari.



Figura 3.1: L'apparato sperimentale utilizzato nelle prove.

La definizione metrica nello spazio e nel tempo del materiale granulare in movimento viene effettuata grazie al rilievo fotogrammetrico, che consente il rilievo topografico superficiale del materiale. Il sistema di supporto delle videocamere, le videocamere stesse, gli illuminatori e tutto il sistema d'acquisizione delle immagini hanno lo scopo di favorire l'acquisizione di immagini di buona qualità per la restituzione fotogrammetrica.

3.2 Il sistema fisico

Per simulare i fenomeni granulari in laboratorio ci si è serviti di un sistema fisico costituito da 2 piani inclinati in forex liscio, di dimensioni $150\text{ cm} \times 150\text{ cm}$; per il piano di valle è stata scelta un'inclinazione fissa di 6.5° sull'orizzontale, mentre il piano di monte, regolabile tramite pistone idraulico o attraverso 2 aste telescopiche, è stato inclinato di 27.5° (Figura 3.2). Per il raccordo delle pendenze di monte e di valle, si è optato per del nastro adesivo liscio.

La simulazione del fenomeno incanalato, è stata ottenuta posizionando una canaletta in plexiglass costituita da 2 sponde laterali trasparenti per evitare la dispersione laterale del materiale. Tale canaletta ha le pareti di 1 cm di spessore e sezione trasversale rettangolare, con base di 20 cm e con altezza di 15 cm (Figura 3.3). Nel caso di moto incanalato il serbatoio di alimentazione è stato ottenuto separando una parte a monte della canaletta con un setto removibile in plexiglass. Il setto viene inserito in 2 gargami ricavati sulla pareti della canaletta stessa. La sezione del serbatoio è la stessa della canaletta e la lunghezza è di 29.5 cm . Il massimo volume del serbatoio di alimentazione è di 8.85 dm^3 .

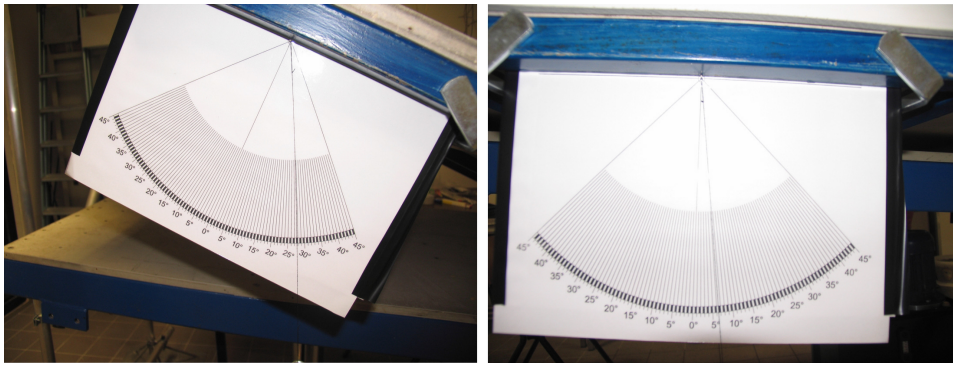


Figura 3.2: Clisimetri appositamente architettati per il posizionamento dei piani di monte e valle alla corretta inclinazione.

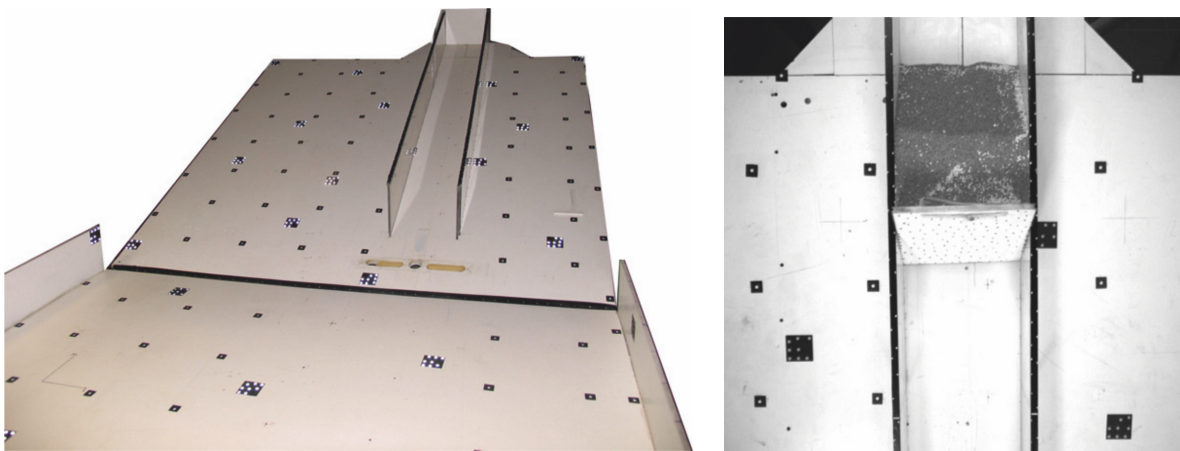


Figura 3.3: Lo scorrimento canalizzato in corrispondenza del piano di monte viene permesso dalla predisposizione delle 2 sponde laterali. Il rilascio del materiale viene permesso dal sollevamento della paratoia innestata tra le sponde.

3.2.1 I coni di rallentamento

Per simulare l'azione di rallentamento operata da coni sull'ammasso granulare, è stato utilizzato un cono in nylon opportunamente costruito per pendenze di 27° , e quindi adatto alle nostre sperimentazioni. La sua altezza è di 30 mm per una lunghezza di 10 cm circa; esso non ha base circolare ma presenta una parte allungata verso valle, per aumentare la stabilità della struttura (Figura 3.4). I coni sono stati progettati ipotizzando un angolo d'attrito di 45° , parametro riscontrabile nella realtà se ricopriamo i cumuli in terra con dei massi ciclopici. I coni di rallentamento e deviazione sono utilizzati per impedire impatti contro strutture vulnerabili e per deviarne lateralmente il materiale.



Figura 3.4: Conoidi in nylon per la riproduzione in scala di modello, da applicare rispettivamente su piani inclinati di 30 gradi (rosso), 27 gradi (arancio), e 24 gradi (giallo) rispetto all'orizzontale.

3.2.2 Il deviatore di flusso

Per la simulazione di prove con materiale incanalato e per la valutazione del comportamento derivante dall'impatto, è stato costruito un deviatore di flusso in legno con inclinazione di 45° sull'orizzontale e ruotato di 25° rispetto all'asse y del sistema di riferimento adottato. Il deviatore è stato collocato allo sbocco sul piano di valle, subito dopo il cambio di pendenza (Figura 3.5).

3.2.3 Materiali granulari impiegati nei test

Materiale granulare grossolano

Il materiale granulare grossolano è costituito, per lo più, da materiale ghiaioso porfirico subangolare e da frammenti di natura mista. Il diametro medio è pari a 12 mm , il fattore di forma è pari a 0.7 . (Figura 3.6).

Al fine di caratterizzare il materiale per successive applicazioni matematico-numeriche, sono stati effettuati dei test in laboratorio per determinare l'angolo d'attrito tra il materiale granulare e la superficie della canaletta, l'angolo di natural declivio e l'angolo d'attrito dinamico del materiale.



Figura 3.5: Deviatore di flusso.

L'angolo d'attrito materiale -canaletta Per determinare l'angolo d'attrito tra il materiale e la canaletta si è fatto uso di una scatola di taglio di dimensioni $19.2\text{ cm} \times 19.2\text{ cm} \times 15\text{ cm}$. La scatola non ha fondo proprio. Il materiale viene inserito al suo interno e messo a contatto con la superficie della canaletta. Il bordo inferiore della scatola è tenuto sollevato rispetto al piano della canaletta per mezzo di quattro ruote ad attrito trascurabile. Lo spazio tra il bordo inferiore della scatola ed il piano della canaletta è minimo rispetto alle dimensioni minime del materiale granulare utilizzato (dell'ordine di 0.5 mm).

La scatola è collegata mediante una corda, deviata da una carrucola ad attrito volvente trascurabile, ad un recipiente il cui peso viene aumentato, in condizioni quasi statiche, versando del materiale ed incrementando, così, lo sforzo destabilizzante sulla scatola. La prova termina quando la scatola viene messa in movimento dal carico applicato. Il sistema sperimentale di misura è mostrato in Figura 3.7.

La prova è stata ripetuta per 4 valori di carico differenti, rispettivamente: 2 kg, 4 kg, 6 kg, 8 kg. Ad ogni carico la prova è stata ripetuta 4 volte per stimare un valore medio rappresentativo e per verificare la ripetibilità della prova (capacità di un apparato sperimentale di fornire risultati a varianza bassa, quando soggetto alle stesse condizioni sperimentali).

Nella ipotesi che il materiale presenti un comportamento Coulombiano è stato possibile stimare, per ogni prova, un valore dell'angolo di attrito γ secondo l'espressione:

$$\gamma = \arctan(P_{mat}/P^*) \quad (3.1)$$

dove:

- γ : angolo d'attrito tra il materiale ed il fondo della canaletta;
- P_{mat} : peso del materiale granulare contenuto nella scatola;
- P^* : peso necessario per muovere il materiale (somma del peso del secchio e del materiale che mano a mano si va ad aggiungere).



Figura 3.6: Materiale granulare grossolano.

Avendo nota l'area della scatola e in base alle relazioni

$$\tau = P_{mat}/A \quad (3.2)$$

$$\sigma = P^*/A \quad (3.3)$$

è stato possibile determinare i valori di τ e σ delle prove per ogni valore del carico, calcolandone valore medio e varianza. In Figura 3.8, sono riportati i risultati delle elaborazioni.

Attraverso la costruzione della linea di tendenza si è potuti risalire alla retta $\tau - \sigma$ di equazione:

$$\tau = \sigma \cdot \tan \gamma \quad (3.4)$$

che risulta:

$$\tau = 0,57 \cdot \sigma \quad (3.5)$$

ottenendo un valore medio dell'angolo d'attrito pari a:

$$\gamma = 29.7^\circ \quad (3.6)$$

Sperimentalmente durante le prove si doveva controllare che la misura dell'angolo d'attrito calcolato non risentisse dell'*effetto di parete*. Per *effetto di parete* si intende l'effetto per il quale un materiale contenuto in una scatola distribuisce parte del suo peso alle pareti della scatola stessa e non al fondo. Questo crea una diminuzione del carico al fondo e quindi un angolo d'attrito stimato minore. Si assiste maggiormente a questo fenomeno quando aumenta l'altezza di materiale nella scatola stessa. I risultati ottenuti in laboratorio dell'angolo d'attrito γ rispetto all'altezza del materiale, normalizzato al lato della scatola stessa (h/l), hanno mostrato come questo effetto possa ritenersi trascurabile (Figura 3.9).



Figura 3.7: Apparato sperimentale per la determinazione dell'angolo d'attrito tra il materiale e la canaletta.

L'angolo di natural declivio e dinamico del materiale Per angolo di natural declivio, o angolo di riposo φ , si intende l'angolo sull'orizzontale che un materiale granulare assume naturalmente. Per angolo dinamico, ϕ , si intende l'angolo sull'orizzontale a cui lo stesso materiale deve essere posto per essere messo nuovamente in movimento.

La stima degli angoli di natural declivio e dinamico è stata eseguita posizionando orizzontalmente il piano di valle della canaletta e collocando una adeguata quantità di materiale granulare grossolano, secondo una forma iniziale tronco-conica.

In seguito, mediante l'attivazione del pistone oleodinamico, è stata incrementata la pendenza del piano fino a che il materiale non ha iniziato a mettersi in movimento e a stabilizzarsi nuovamente secondo il suo angolo di riposo (Figura 3.10).

L'angolo di riposo è stato stimato con clisimetro. A seguito della riattivazione del pistone è stato poi determinato l'angolo sull'orizzontale che permetteva la riattivazione del materiale e il nuovo angolo di riposo all'arresto.

Sono stati eseguiti diversi cicli del processo descritto. I dati raccolti sono mostrati in Tabella 3.1.

	$\alpha(^{\circ})$	$\varphi(^{\circ})$	$\phi(^{\circ})$
Prova 1	10.5	36	38.5
Prova 2	13.0	35	37.5
Prova 3	15.5	34	36.6

Tabella 3.1: Pendenza della canaletta e angolo di natural declivio del materiale calcolato durante le prove.

Durante le prove sono state acquisite le immagini con le otto camere posizionate attorno al deposito. Durante la prova 3 di Tabella 3.1 sono stati elaborati due modelli 3D

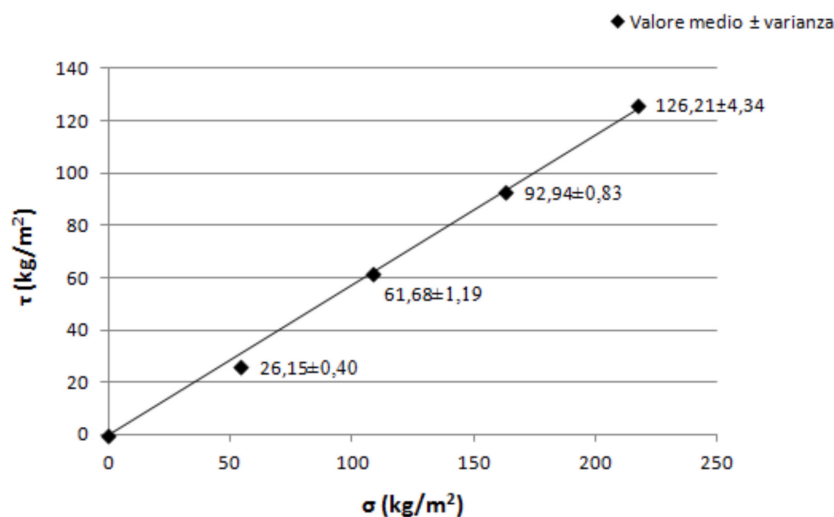


Figura 3.8: Curva caratterizzante il materiale granulare.

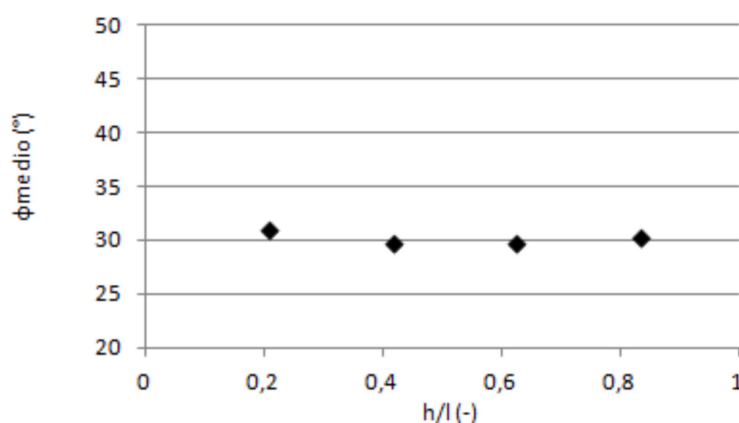


Figura 3.9: Andamento dell'angolo d'attrito medio calcolato per step di carico successivi.

attraverso l'utilizzo del software AgiSoft PhotoScan: uno nell'istante in cui il materiale inizia il suo movimento, a causa della variazione di pendenza della canaletta, e uno nell'istante in cui questo movimento cessa. Sul modello tridimensionale elaborato è stato eseguito un profilo longitudinale mostrato in Figura 3.11, dove vengono riportati i profili del deposito in questi due istanti. Su di essi sono stati calcolati i valori di inclinazione della canaletta, dell'angolo di natural declivio e dell'angolo di attrito dinamico riportati in Tabella 3.2.

Come si può vedere il confronto tra le misure sperimentali condotte in laboratorio con il clisimetro e le misure determinate sui profili dai modelli tridimensionali non hanno mostrato differenze di misura sostanziali ed anzi costituiscono una evidenza della precisione che può essere ottenuta mediante la restituzione fotogrammetrica.

Materiale zeolitico

Il materiale con cui viene simulato il moto granulare è costituito da particelle granulari di resina anionica, le zeoliti, come già accennato. Sono costituite da silico-alluminati

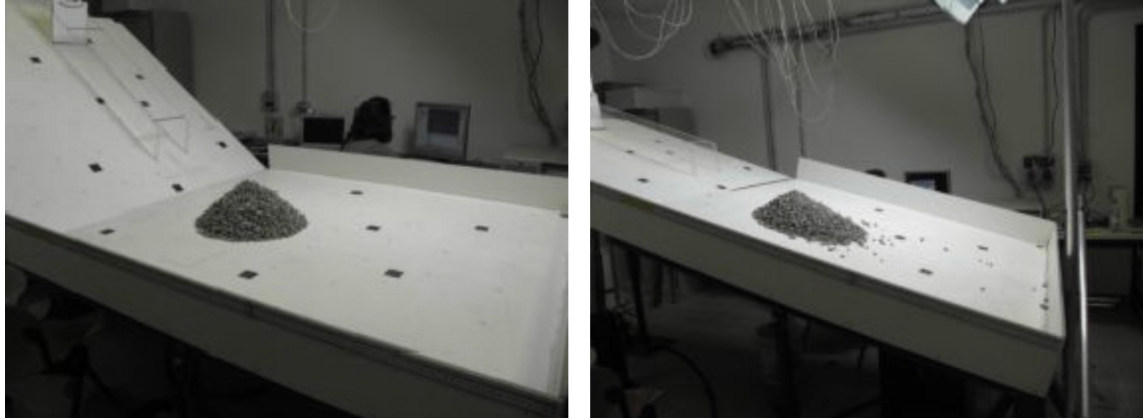


Figura 3.10: Angolo d'attrito dinamico (a sinistra) e di natural declivio (a destra), determinati in seguito a variazione dell'inclinazione del piano di base, effettuata grazie all'innalzamento graduale del pistone idraulico.

	$\alpha(^{\circ})$	$\varphi(^{\circ})$	$\varphi(^{\circ})$
Prova 3 sperimentale	15.5	34	36.5
Prova 3 fotogrammetria	14.5	33	35.5

Tabella 3.2: Confronto tra i valori sperimentali determinati sul deposito e i valori calcolati dal modello tridimensionale elaborati dal modello Agisoft Photoscan.

idrati, possono essere naturali o artificiali, hanno forma sferica, superficie liscia e diametro variabile tra i 2 decimi di mm e i 2 mm (Figura 3.12).

La diversa granulometria delle zeoliti permette di simulare le particelle arrotondate che si formano in neve densa, a seguito del processo di granulazione durante il movimento discendente della valanga, ma è utile anche per l'osservazione di aspetti reologico attritivi osservabili e riconoscibili nei debris flow.

Per facilitare e rendere possibile l'individuazione di punti in comune tra le diverse fotografie si è reso necessario l'utilizzo di materiale di colore bianco (Figura 3.13), anch'esso rotondeggiante, più leggero delle zeoliti, tale da rimanere sulla superficie del deposito al termine del movimento.

È così possibile avere a disposizione un grande numero di punti, i cosiddetti tie points, che aumentano notevolmente la precisione del processo fotogrammetrico al crescere del numero di punti analizzato.

La densità delle zeoliti sintetiche è di 1080 kg/m^3 , mentre la densità compressa è di 1106 kg/m^3 [16].

Nella Tabella 3.3 è descritta l'analisi granulometrica dei materiali granulari utilizzati nelle sperimentazioni.

Le stesse procedure per la caratterizzazione dei parametri attritivi con scatola di taglio sono state adottate per il materiale zeolitico. Per tali materiali sono stati misurati da D'Accordi [15] i valori statici dell'angolo d'attrito interno φ e dell'angolo d'attrito al fondo γ . In particolare in si riportano i seguenti valori:

$$\varphi = 28^{\circ} \pm 0.75$$

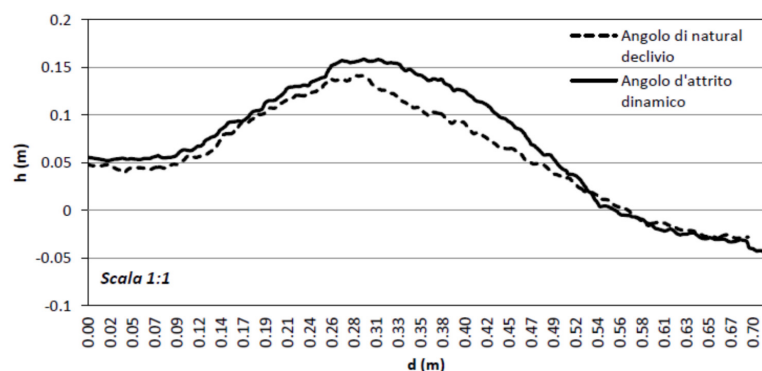


Figura 3.11: Profilo longitudinale dell'ammasso granulare durante le prove per determinare l'angolo di natural declivio e l'angolo d'attrito dinamico.



Figura 3.12: Zeolite sintetica.

La pendenza della retta di regressione lineare è pari alla tangente dell'angolo d'attrito al fondo γ , per il quale si ricava un valore di 22° . Lo scarto quadratico medio stimato è di 0.75.

$$\gamma = 22^\circ \pm 0.75$$

Il valore dell'angolo d'attrito dinamico ϕ è pari a 30° .

3.3 Il sistema di acquisizione

Il sistema hardware di acquisizione e memorizzazione delle immagini provenienti dalle videocamere è controllato da un codice scritto in Labview. Questo è costituito da:

- 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);



Figura 3.13: Materiale in PVC bianco per favorire la restituzione fotogrammetrica.

μm	zeolite		white sphere	
	g	%	g	%
125-250	/	/	0.5	0.1
250-500	7.7	2.7	0.7	0.2
500-850	242	84.1	2.1	0.6
850-2000	37.9	13.2	148.7	39.0
2000+			228.8	60.1

Tabella 3.3: Dalle caratteristiche granulometriche si evince che il materiale bianco sia di dimensioni maggiori e più della metà del campione analizzato sia superiore ai 2 mm.

- 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.

L'interfaccia grafica, scritto in Labview, per il controllo del processo di acquisizione delle immagini delle videocamere è mostrata in Figura 3.14. I comandi principali sono i seguenti:

- *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.

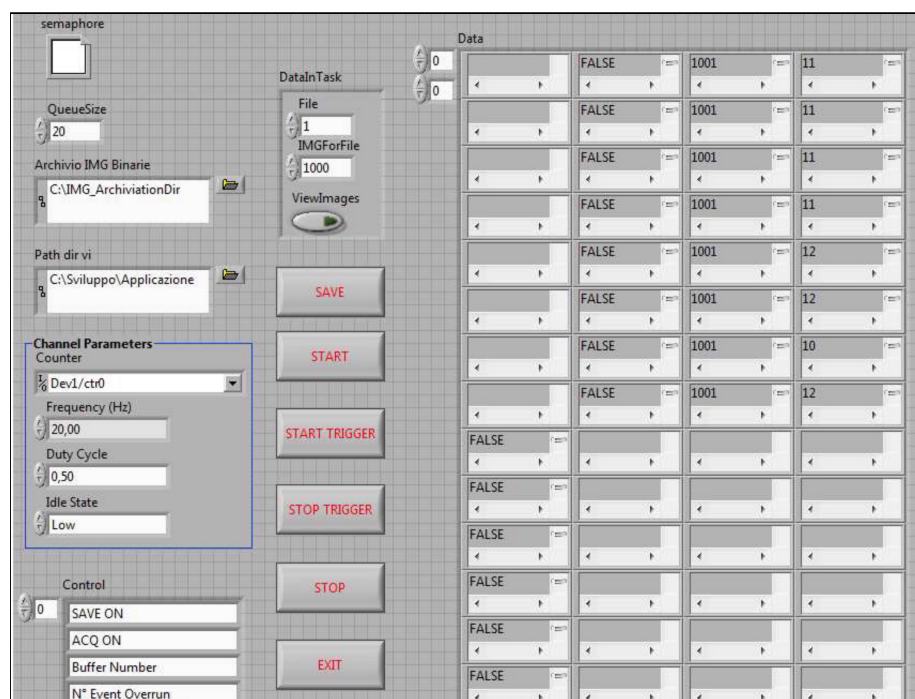


Figura 3.14: Interfaccia grafica di controllo per l’acquisizione delle immagini, scritto in Labview.

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).

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. L’operatore ha un feedback del comando dalla seconda 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 START;

- 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.

3.3.1 La sincronizzazione dei frames

Una proprietà fondamentale nella acquisizione dei frames è la sincronizzazione dei tempi di scatto. Questa permette di ottenere otto immagini della massa in movimento, nello stesso istante, permettendo le elaborazioni fotogrammetriche (Figura 3.16).

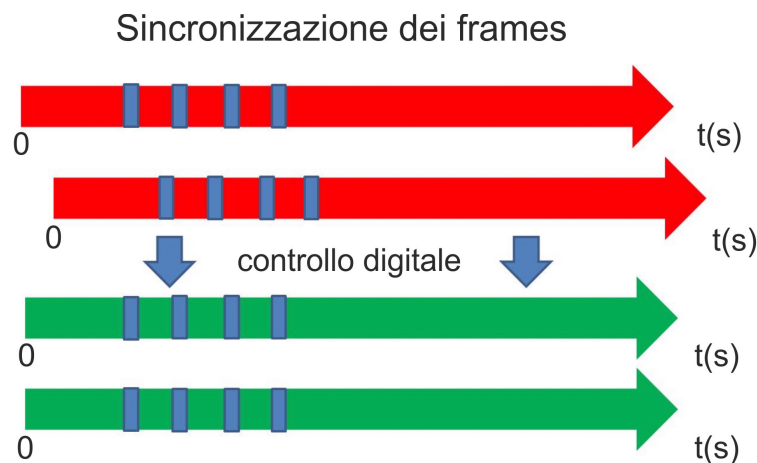


Figura 3.15: Sincronizzazione delle videocamere ad un generico istante di tempo t .

La sincronizzazione è stata ottenuta mediante un controllo digitale gestito dal programma di acquisizione scritto in Labview.

La verifica della sincronia delle immagini, e dell'intero sistema di acquisizione hardware e software di trasmissione e archiviazione delle immagini, è stata realizzata mediante l'uso di un cronografo (frequenza di rotazione della lancetta pari a 1 giro al secondo) ripreso simultaneamente dalle otto videocamere. In Figura 3.16 sono mostrati gli otto frame ottenuti dalle otto videocamere ad un istante stabilito. La sincronizzazione appare adeguata.

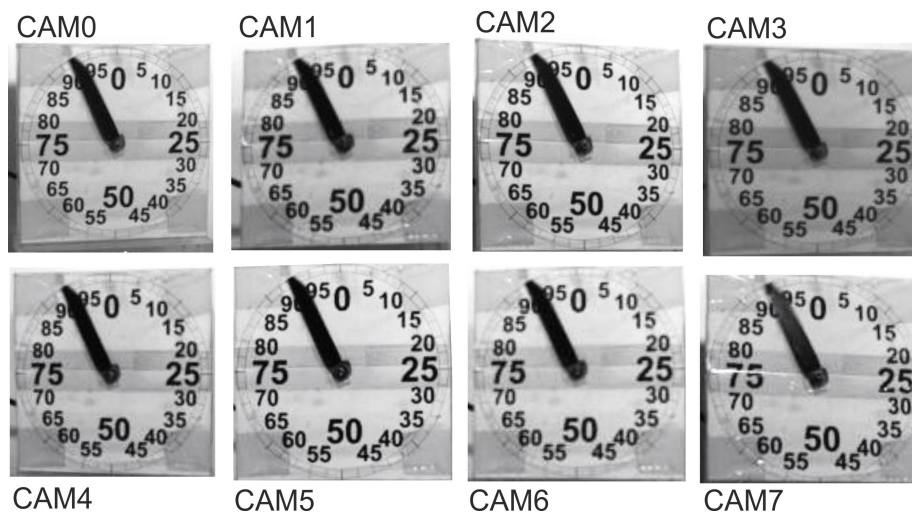


Figura 3.16: Metodologia di verifica per il controllo della corretta sincronizzazione dei frames.

3.4 Le videocamere Ace GigE Basler

Le videocamere utilizzate sono del tipo Basler Ace GigE (Figura 3.17), sulle quali sono stati montati obiettivi a focale fissa a diversa distanza focale: quattro da 8 mm, due da 6 mm e due da 12 mm. Sono stati scelti obiettivi a focale fissa per le seguenti ragioni:

- la focale fissa è meno soggetta ad aberrazioni perché lo schema costruttivo delle lenti è più semplice;
- a parità di tempo di esposizione, permette di ottenere riproduzioni fotografiche adeguate in condizioni di minore luminosità rispetto ad un obiettivo zoom;
- la sua configurazione meccanica fa sì che l'apertura massima possibile del diaframma sia maggiore che negli zoom, con la conseguente possibilità di usare tempi di esposizione più brevi e quindi non risentire "dell'effetto mosso".

3.4.1 Specifiche delle videocamere

Le caratteristiche rilevanti delle videocamere agli scopi del presente lavoro sono le seguenti (Figura 3.18):



Figura 3.17: Videocamera Ace GigE Basler utilizzata nelle sperimentazioni.

- *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 nostre camere acquisiscono immagini in scala di grigi; questo aumenta la risoluzione dell'immagine.

Le videocamere sono montate al di sopra della canaletta su una struttura di supporto visibile in Figura 3.1. Gli elementi di collegamento alla struttura di supporto permettono la rotazione delle videocamere attorno ai tre assi cartesiani.

Particolare attenzione deve essere posta nell'uso di queste telecamere a causa della loro sensibilità alle interferenze elettromagnetiche e a scariche elettrostatiche che possono creare problemi come falsi impulsi di *triggering* oppure interruzione dell'acquisizione delle immagini. Inoltre bisogna mantenere monitorata la temperatura delle camere in uso che non deve superare i 50°. Un metodo per assicurare una buona dissipazione del calore delle camere sta nel montarle su supporti metallici e attrezzare il laboratorio con l'aria condizionata [10].

Specifications

Basler ace	acA1300-30gm/gc	acA1280-60gm/gc ^{NEW}	acA1300-60gm/gc ^{NEW}	acA1300-60gmNIR ^{NEW}	acA1600-20gm/gc	acA1600-60gm/gc ^{NEW}
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 3.18: Specifiche delle camere Basler acA 1600-20 gm/gc.

Per l'interfacciamento con le camere Ace GigE è necessario utilizzare il driver *Pylon Driver Package*. Questo programma permette la gestione degli indirizzi IP delle camere (*Pylon IP Configuration Tool*), la modifica dei parametri delle camere (*Pylon Viewer*) e il controllo delle funzionalità della camera (*Pylon API*).

Il comando di acquisizione dell'immagine da parte delle telecamere viene gestito da un trigger. Il segnale di trigger è fornito da una scheda *National Instrument PCI-6602* (Peripheral Component Interconnect) in grado di trasmettere segnali in parallelo. Questo permette, attraverso un impulso in differenza di potenziale, compreso tra 0 e 5 Volt, di iniziare l'acquisizione delle immagini oppure arrestarla in tutte le otto telecamere simultaneamente.

Ogni camera è collegata attraverso due cavi. Il primo è un *6-pin connector* che, collegato al trigger gestisce l'acquisizione delle telecamere. Il secondo è un Ethernet cable che, oltre a svolgere la funzione di alimentatore delle camere, permette di scaricare le immagini sul computer attraverso le schede video *National Instrument PCIexpress- 8235*. A queste schede arrivano, attraverso gli otto ethernet cables, i dati simultaneamente e ne permettono una veloce acquisizione da parte del computer.

3.4.2 Le ottiche

Le ottiche, dette anche obiettivi fotogrammetrici, hanno la funzione di proiettare l'immagine sul piano focale dov'è posto il CCD. Sono composte da un numero di lenti variabile da tre a dieci a seconda della complessità dell'obiettivo. Gli obiettivi sono formati da vetri ad alto indice di rifrazione che, sottoposti a trattamenti antiriflesso, minimizzano la quantità di luce riflessa dalla lente aumentandone quella rifratta. Il comportamento delle ottiche è approssimabile a quello delle lenti, infatti la distanza focale è la misura in mm della distanza fra il centro ottico dell'obiettivo (o punto nodale posteriore) e il piano focale.

La lunghezza focale delle ottiche e le dimensioni del CCD determinano l'angolo di campo della ripresa.

Nel presente lavoro sono state utilizzate otto telecamere Basler Ace GigE differenti

per l'obiettivo montato. In tutti i casi la distanza focale è fissa. Quattro ottiche sono da otto mm, due da sei mm e due da dodici mm. Questa scelta è stata fatta considerando la geometria dell'area da riprendere, l'angolo di campo necessario, la risoluzione delle varie camere, la distanza tra camera e massa in movimento. Infatti per ottenere una sovrapposizione di coppie di immagini maggiore del 60% (necessaria ai fini fotogrammetrici), il metodo migliore è quello di posizionare le camere allineate una dietro l'altra al di sopra della canaletta. Siccome la canaletta è composta da due piani a diversa pendenza, la distanza tra questa e le telecamere risulta variabile. Da qui deriva l'opportunità di adottare focali differenti.

In fase di progettazione del sistema di ripresa (geometria, tipo di videocamere, tipo di ottiche) sono stati ipotizzati diversi scenari con l'uso di otto telecamere con obiettivi aventi la stessa focale e focali diverse. Per ogni combinazione di video-camera e obiettivo è stato determinato l'angolo di campo secondo l'eq. 3.7.

$$\alpha = 2 \arctan(d_2/f) \quad (3.7)$$

dove:

- α è l'angolo di campo;
- d_2 è la metà della diagonale del CCD;
- f focale dell'obiettivo utilizzato.

Quindi in base delle dimensioni della diagonale del sensore montato nelle camere e ponendo il fuoco all'infinito si è calcolato l'angolo di campo per ogni camera secondo l'eq.3.7. In questo modo dai progetti si può calcolare la differente copertura della canaletta da parte delle telecamere variabile da 1 a 6 fotogrammi. Per i nostri scopi fotogrammetrici si vuole più sovrapposizioni possibili degli angoli di campo. La combinazione di camere con focali diverse permette una migliore copertura della canaletta.

Tempo di esposizione e diaframma

Per ottenere immagini di buona qualità è necessario considerare tre fattori: il tempo di esposizione, che si imposta sul corpo macchina, l'apertura del diaframma, che si regola sull'obiettivo, e il tipo di sensore che si utilizza.

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). In combinazione con l'apertura del diaframma, il tempo di esposizione regola la giusta quantità di luce per ottenere una fotografia ben esposta.

A parità di esposizione, un tempo breve richiede un diaframma più aperto, mentre un tempo lungo si abbina ad un diaframma più chiuso. Ai fini di una corretta esposizione, al dimezzarsi del tempo la apertura del diaframma raddoppia e viceversa. Cambiare il tempo di esposizione significa influire sul modo in cui il movimento del soggetto o degli oggetti viene impressionato sulla pellicola.

Il diaframma è un'apertura solitamente circolare o poligonale, situata in corrispondenza del centro ottico dell'obbiettivo, 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.

Nelle fotocamere, il diaframma può essere regolato su diverse aperture, distribuite regolarmente su una scala di intervalli detti numeri f (f/numero) o f/stop o aperture diaframmali o divisioni di diaframma o più semplicemente diaframmi. La sequenza dei valori di numeri f è una progressione geometrica di ragione (circa 1,4) standardizzata.

I numeri f esprimono il rapporto focale, cioè il rapporto tra la lunghezza focale dell'obiettivo e il diametro dell'apertura del diaframma. Pertanto, a valori più bassi di f corrispondono aperture di diaframma più ampie.

A parità degli altri parametri (obiettivo, formato, ecc) la profondità di campo è fortemente influenzata dall'apertura del diaframma: se questo è completamente aperto essa assume il minimo valore, viceversa diminuendo l'apertura si aumenta la profondità di campo, che raggiunge il massimo quando il diaframma è portato all'apertura minima.

Allo scopo di ottenere immagini di qualità dell'ammasso in movimento, alla massima frequenza di acquisizione di 20 Hz, il tempo di esposizione e l'apertura del diaframma vanno scelti con attenzione. Bisogna prima porre attenzione a scegliere il tempo di esposizione in base anche alla frequenza di acquisizione. Ipotizzando di voler acquisire a 20 Hz, si può scegliere un tempo di esposizione minore o al massimo uguale alla frequenza di acquisizione stessa. Quindi nel caso di 20 Hz il tempo di acquisizione deve essere minore di 0.05 s. Non rispettare questa semplice regola porta ad avere una frequenza di acquisizione più bassa. Una volta presa questa precauzione si deve scegliere, in base alla velocità del fenomeno che si vuole ricostruire fotogrammetricamente, la combinazione di tempo d'esposizione, diaframma e luce ambientale.

L'illuminazione ambientale è stata realizzata mediante due illuminatori ad alta frequenza Lupo Quadrilight con frequenza nominale di 48.000 Hz, che assicurano una continua ed omogenea illuminazione della scena anche scegliendo tempi di esposizione molto brevi.

Nel caso presente la necessità è quella di avere tempi di esposizione brevi, in modo da poter fermare, il più accuratamente possibile, l'ammasso in movimento.

Sono state fatte diverse prove con il contasecondi analogico e le otto videocamere e sono stati regolati i tempi d'esposizione, il diaframma e la intensità luminosa. Si è proceduto nel modo che segue:

- prima acquisizione: tempo di esposizione di 0.1 s, diaframma molto chiuso, illuminazione naturale;
- seconda acquisizione: tempo di esposizione di 0.06 s, diaframma più aperto, illuminazione naturale;
- terza acquisizione: tempo di esposizione 0.01 s, diaframma molto aperto, un illuminatore ad alta frequenza acceso;
- quarta acquisizione: tempo di esposizione 0.0003 s, diaframma totalmente aperto, due illuminatori ad alta frequenza accesi .

La sequenza di acquisizione è mostrata in Figura 3.19. Si nota che diminuendo progressivamente il tempo di esposizione, e variando conseguentemente gli altri parametri, l'immagine della lancetta in movimento risulta sempre più nitida.

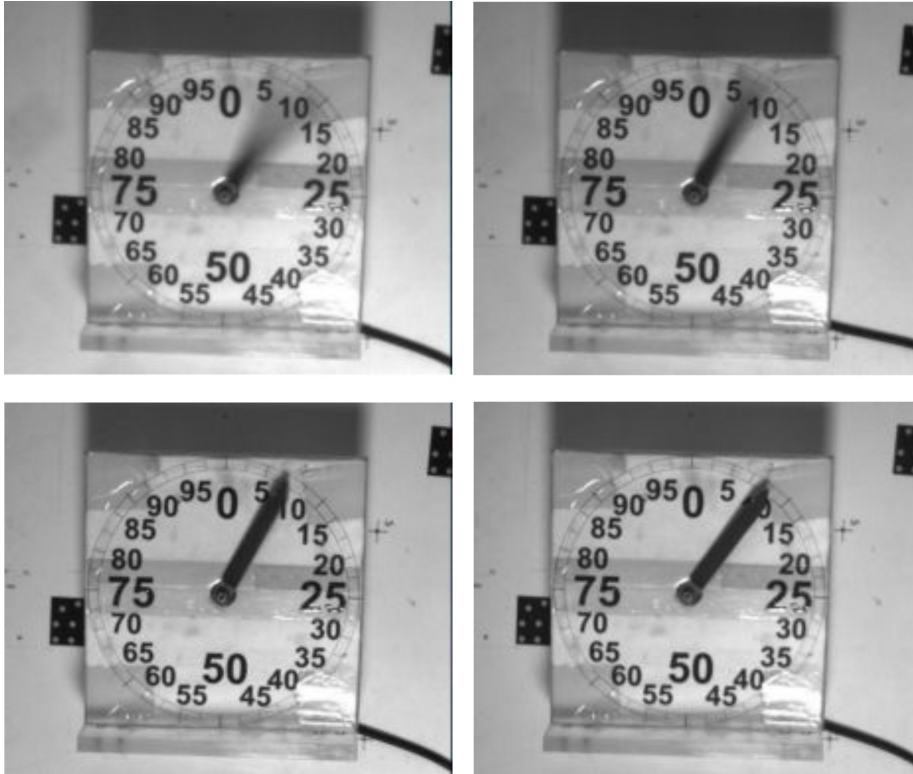


Figura 3.19: Il tempo di esposizione regola la nitidezza dell'immagine. La nitidezza aumenta al diminuire del tempo di esposizione. In figura il tempo di esposizione utilizzato è 0.1s, 0.06s, 0.01s, 0.003s.

Nelle prove sperimentali viene quindi scelto per tutte le camere un tempo di esposizione di 0.0003 s, con diaframma totalmente aperto e i due illuminatori ad alta frequenza accesi. Si è inoltre calcolato il numero di emissioni dell'illuminatore durante il tempo di esposizione secondo la formula:

$$n = t_{\text{exp}}/f \quad (3.8)$$

dove:

- n : numero di emissioni;
- t_{exp} : tempo di esposizione;
- f : frequenza dell'illuminatore.

Dal calcolo risultano 15 emissioni, durante i 0.0003 s di esposizione, ancora sufficienti a garantire un'illuminazione omogenea della canaletta durante gli scatti.

3.5 Conclusioni

Nel complesso, tutte le componenti progettate dell'apparato sperimentale sono risultate funzionali allo scopo. In particolare, il sistema d'acquisizione dei frames, gestito dal software Labview, ha garantito la corretta sincronizzazione dei frames provenienti dalle otto videocamere, una adeguata qualità delle immagini ai fini fotogrammetrici, ed una adeguata velocità d'acquisizione alla massima frequenza delle videocamere. Il software di gestione dei file immagine si è mostrato nel complesso di facile utilizzo e di sufficiente stabilità.

La disposizione delle videocamere in configurazione *strisciata aerea* ha garantito buona sovrapposizione tra le immagini. Il numero di frame per ogni area della canaletta variava da 2 a 5. Gli illuminatori ad alta frequenza hanno permesso un notevole incremento della qualità dei frames, consentendo di abbassare notevolmente il tempo di esposizione delle videocamere. La qualità del processo fotogrammetrico viene valutata nei capitoli successivi.

Capitolo 4

Metodologie di laboratorio

4.1 Introduzione

In questo capitolo vengono descritti i passi che hanno portato alla definizione della procedura metodologica per il rilievo tridimensionale dell'evoluzione topografica superficiale di un ammasso granulare in movimento lungo la canaletta sperimentale.

In primo luogo, al fine di garantire immagini di buona qualità per la successiva elaborazione fotogrammetrica, ci si è concentrati sul settaggio delle impostazioni di tutte le componenti del sistema d'acquisizione.

La successiva restituzione fotogrammetrica è stata eseguita mediante l'utilizzo di 2 diversi software che hanno permesso di definire un adatto sistema di riferimento, di rilevare i piani di base della canaletta, i componenti eventualmente montati sulla canaletta (deviatore di flusso e cono di rallentamento) ed infine il materiale granulare in movimento.

L'assemblaggio dei *DTM* provenienti dai 2 software e le informazioni metriche derivate, sono stati ottenuti con un software *GIS*.

4.2 La calibrazione delle videocamere

La calibrazione delle videocamere è una parte essenziale dei sistemi fotogrammetrici nelle applicazioni industriali dal momento che l'accuratezza nelle misurazioni è direttamente correlata alla qualità del sensore ed alla corretta modellazione dei parametri di orientamento interno. I modelli standard per la calibrazione permettono di stabilire la posizione del centro di prospettiva nello spazio immagine (distanza principale e punto principale), i parametri di distorsione radiale e tangenziale ed, infine, le possibili distorsioni lineari all'interno del sensore. Questi parametri vengono calcolati attraverso il *self calibrating bundle adjustment* con disposizione convergente del network di immagini, [26]. Recenti revisioni in merito sono state fornite da Remondino e Fraser [34] e Luhmann [27].

La calibrazione diventa più complicata se si verificano alcuni dei seguenti casi:

- instabilità durante l'acquisizione delle immagini;
- numero di immagini acquisite non sufficienti per la procedura *self calibration*;
- configurazione geometrica delle immagini che non permette il *bundle adjustment* con *self calibration* a causa per esempio dell'angolo di intersezione piccolo o alla mancanza di rotazione ortogonale attorno all'asse ottico;

- l'oggetto non garantisce un numero sufficiente di informazioni (punti, distanze) riconoscibili.

La disponibilità di camere digitali combinata all'accesso diretto alle immagini digitali, ha creato nuove premesse alle applicazioni nel campo della fotogrammetria terrestre. Accanto alla più classica fotogrammetria detta off-line, si sono recentemente sviluppati sistemi on-line completamente automatici che possono quindi essere sfruttati anche da personale non specializzato (Figura 4.1). L'acquisizione del dato può essere effettuata in differenti località, in tempi diversi, e da persone diverse. Essa fornisce misurazioni in tempo reale con collegamento diretto ai processi esterni e fornisce elaborazioni tridimensionali. Tipicamente un sistema on-line consiste di 2 o più videocamere calibrate e orientate che osservano un volume specifico. L'accuratezza di questi sistemi è però inferiore a causa del ridotto numero di videocamere impiegate, e della calibrazione non ottimale, al quale si aggiunge il limitato controllo manuale. Valori tipici di accuratezza sono dell'ordine di $0.2\text{ mm} - 0.5\text{ mm}$ per 2 m di profondità (Broers and Jansing, [13]).

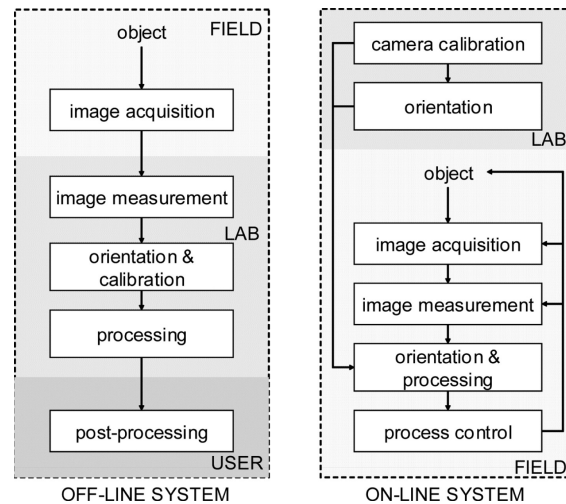


Figura 4.1: Step operativi per sistemi off-line e on-line.

4.2.1 La calibrazione di sistemi off-line

La calibrazione della videocamera utilizzando questi sistemi può essere fatta al solo fine della calibrazione, e quindi con procedura standard, o all'interno della procedura di misurazione di un oggetto (*on the job calibration*). In ogni caso devono essere riconosciuti un adeguato numero di tie points siano essi naturali o predisposti dall'utente. Come alternativa possono essere introdotti vincoli di distanza o dei control points. Normalmente i valori di distorsione sono mantenuti costanti per tutte le immagini, mentre la posizione del centro di prospettiva viene modificata per ogni immagine. Questo metodo porta a significativi miglioramenti nella misura quando le immagini sono distribuite omogeneamente attorno all'oggetto e ruotate attorno all'asse ottico. L'accuratezza della calibrazione delle videocamere può essere misurata dalla precisione dei punti immagine e

oggetto o dalla deviazione standard dei parametri di orientamento interno. Le 8 videocamere utilizzate nei test sperimentali sono state calibrate indipendentemente, per mezzo del software *Australis*.

L'autocalibrazione in Australis

All'interno del software sono disponibili 2 opzioni per la calibrazione automatica delle 8 videocamere. La prima è detta di *Autocal*, e sfrutta il posizionamento di un certo numero di marker retroriflettenti su una determinata superficie o oggetto, anche diverso da quello di interesse fotogrammetrico. Il numero minimo richiesto in ogni immagine è di 6 – 8 marker. La seconda è detta *Camera self-calibration*, la quale è un'operazione interna al bundle adjustment, e differisce in sostanza dalla precedente per il fatto che utilizza tutti i target e non solo i marker retroriflettenti (Figura 4.2)



Figura 4.2: Piano di monte con sponde laterali di contenimento. I marker retroriflettenti sono utili per la calibrazione e per il settaggio della scala. I Control Point distribuiti sulla superficie definiscono tridimensionalmente entrambi i piani.

Gli accorgimenti base per una corretta autocalibrazione sono i seguenti:

- le lenti delle videocamere non devono essere rimesse a fuoco durante la sessione di acquisizione delle immagini;
- lo zoom non deve essere modificato;
- le immagini devono essere acquisite alla massima risoluzione e qualità possibile. Per esempio una videocamera a 2 *megapixel*, dovrebbe registrare immagini di 2 *megapixel*, alla più alta qualità *JPEG*;
- diametro dei target definito da almeno 5 *pixel* nelle immagini;
- distribuzione tridimensionale dei target e non planare;

- sia la disposizione dei target che lo zoom/fuoco fissi sono fondamentali. I target non devono essere mossi;
- l'angolo di convergenza ideale tra i raggi delle videocamere più esterne è preferibile essere compreso tra 70° e 100° .

Nel caso di utilizzo di target retroriflettenti, è necessario l'utilizzo del flash, col possibile inconveniente, però, della saturazione dei target e quindi di difficoltà nel loro riconoscimento. Un accorgimento può essere quello di porre un foglio bianco sottile davanti al flash in modo da ridurne l'intensità.

I parametri di calibrazione delle videocamere sono elencati in Figura 4.3 e sono:

- *lunghezza focale e coordinate del punto principale*: l'offset del punto principale indica di quanto l'asse ottico risulti spostato dal centro dell'immagine. La lunghezza focale si riferisce alla distanza principale, che cambia con la messa a fuoco. La lunghezza focale nominale delle lenti generalmente è riferita al fuoco infinito;
- *distorsione radiale*: I 3 parametri k_1, k_2, k_3 descrivono la correzione radiale delle lenti. La distorsione radiale varia con la messa a fuoco delle lenti, motivo per il quale nè lo zoom nè la messa a fuoco dovrebbero essere modificati;
- *distorsione tangenziale*: I parametri P_1 e P_2 esprimono l'effetto di decentramento degli elementi ottici all'interno dell'assemblamento delle lenti. L'errore è generalmente molto piccolo, se confrontato alla distorsione radiale e può essere sovente trascurato.

La calibrazione, utilizzando i 2 diversi approcci, varia generalmente di poco a vantaggio della *self-calibration* completa. I parametri di distorsione riferiti ad ognuna delle 8 videocamere vengono mantenuti fissi in tutte le operazioni condotte da qui in avanti. L'utilizzo contemporaneo di videocamere con caratteristiche focali diverse, impone infatti la stabilizzazione dei parametri di orientamento interno con annessa eliminazione di un numero significativo di incognite. Dalla qualità della calibrazione dipende la riuscita o meno della restituzione fotogrammetrica.

Esempio di calibrazione di una videocamera

Le coordinate immagine corrette $x(\text{corr})$ e $y(\text{corr})$, possono essere calcolate dalle coordinate misurate $x(\text{meas})$ e $y(\text{meas})$ usando la formula:

$$\begin{aligned} x &= x(\text{meas}) - x(p) \\ y &= y(\text{meas}) - y(p) \end{aligned}$$

quindi rispetto al punto principale:

$$r^2 = x^2 + y^2$$

$$x(\text{corr}) = x(\text{meas}) - x_p + x \frac{dr}{r} + P_1 (r^2 + 2x^2) + 2P_2 xy \quad (4.1)$$

$$y(\text{corr}) = y(\text{meas}) - y_p + y \frac{dr}{r} + P_2 (r^2 + 2y^2) + 2P_1 xy \quad (4.2)$$

dove:

$$dr = k_1 * r^3 + k_2 * r^5 + k_3 * r^7$$

e dove la correzione in x e y della distorsione radiale dr (μm) per qualsiasi distanza radiale r (mm) è rispettivamente:

$$dx = x \frac{dr}{r}$$

$$dy = y \frac{dr}{r}$$

		Value	$\sigma(\text{mm})$
Principal distance (mm)	c	12.7727	0.002
Principal point offset in x-image coordinate (mm)	x_p	-0.0138	0.002
Principal point offset in y-image coordinate (mm)	y_p	0.1185	0.002
3rd-order term of radial distortion correction	k_1	7.42E-04	1.353E-05
5th-order term of radial distortion correction	k_2	-2.75E-05	1.798E-06
7th-order term of radial distortion correction	k_3	3.56E-07	6.90E-08
Coefficient of decentering distortion	P_1	-1.07E-04	3.88E-06
Coefficient of decentering distortion	P_2	-8.10E-06	3.54E-06

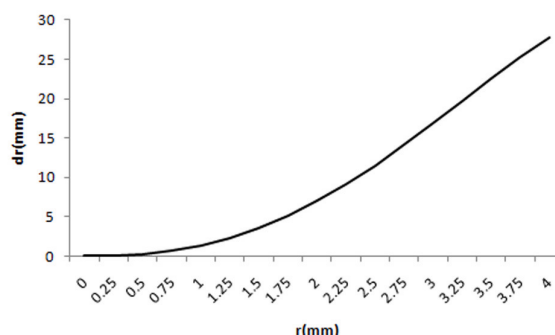


Figura 4.3: Parametri di distorsione di una delle 8 videocamere utilizzate.

Esportazione in Agisoft

L'esportazione dei parametri di orientamento interno in Photoscan per l'esecuzione dei test sperimentali richiede un ulteriore passaggio a causa della diversa modalità di valutazione dei parametri, rispetto al software *Australis*. In particolare, i parametri sono misurati in pixel, e non in millimetri (Figura 4.4). L'apposito tool Agisoft Lens provvede alla conversione dei parametri.

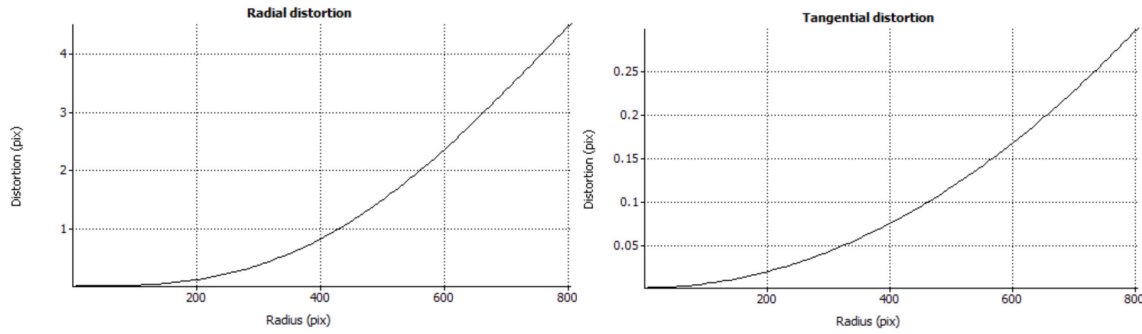


Figura 4.4: Esempio di valutazione della distorsione radiale e tangenziale in pixel effettuata dal software Agisoft per una delle videocamere utilizzate nella attività di laboratorio.

4.2.2 I risultati della calibrazione

I risultati del processo di calibrazione sono presentati in Tabella 4.1 per le otto videocamere utilizzate. La calibrazione è stata eseguita a due diverse distanze: 2 m e 1.15 m. La Tabella fornisce la distanza focale e le coordinate del centro della CCD.

Dalla osservazione della Tabella 4.1, si può dedurre che:

- i valori di focale, per 2 altezze diverse variano nell'ordine di qualche micron o decimo di micron;
- le coordinate del centro della CCD, rispetto al centro dell'asse ottico, variano di qualche micron.

ID cam	c (mm)		x_p (mm)		y_p (mm)	
	2 m	1.15 m	2 m	1.15 m	2 m	1.15 m
cam0	12.7727	12.7737	-0.0138	-0.0109	0.1185	0.1121
cam5	12.7705	12.7584	0.0058	0.0024	0.1829	0.1972
cam2	8.3016	8.3007	-0.0173	-0.0237	0.0542	0.0657
cam3	8.3137	8.3136	-0.0876	-0.09	0.0272	0.0351
cam4	8.2889	8.2825	-0.0686	-0.0617	0.012	-0.0087
cam7	8.3171	8.3185	0.1025	0.1019	-0.0643	-0.0412
cam1	6.1824	6.1838	-0.0266	-0.0302	0.0932	0.087
cam6	6.2098	6.1905	-0.1326	-0.1356	0.0796	0.0729

Tabella 4.1: Distanza focale e posizione del centro della CCD rispetto all'asse ottico per le otto videocamere utilizzate, ottenuti mediante calibrazione con Australis. I parametri sono valutati per le distanze di 2 m e 1.15 m.

Le curve di distorsione radiale sono riportate in Figura 4.5. Si osserva che nelle videocamere con focale 6 mm la distorsione radiale tende ad essere di due ordini di grandezza

superiore rispetto alla distorsione radiale delle ottiche con focale 8 mm e 12 mm, avvicinandosi ai bordi della CCD. Se si sovrappongono curve di camere differenti, aventi però la stessa focale, si notano piccole differenze, dell'ordine di qualche μm , soprattutto nella zona del bordo della CCD dove, come ci si deve aspettare, la distorsione radiale è massima.

Le tarature effettuate permettono di concludere, inoltre, che l'altezza della struttura di sostegno delle videocamere e la distanza rispetto ai piani di base non influisce significativamente sulla stima dei parametri di orientamento interno.

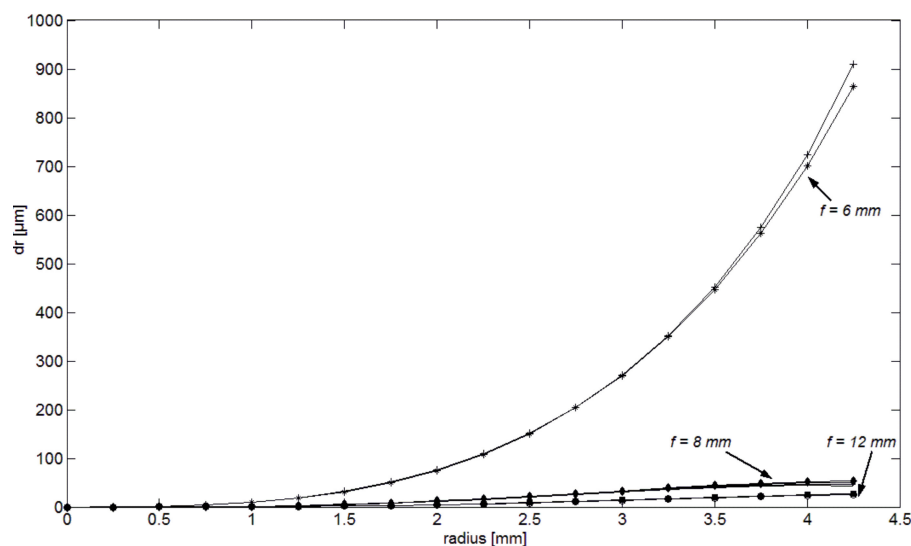


Figura 4.5: Curve di distorsione radiale calcolate per le 8 videocamere impiegate nei test sperimentali.

4.3 La restituzione fotogrammetrica dei piani di base

La restituzione fotogrammetrica dei piani di base della canaletta sperimentale, delle sponde per il moto incanalato, e del deviatore di flusso posizionato sul piano di base, è stata ottenuta attraverso il riconoscimento manuale di un certo numero di Control Points distribuiti omogeneamente, associati a dei target retroriflettenti utilizzati sia per la calibrazione delle videocamere, sia per la calibrazione della camera digitale grazie alla quale è stata poi ottenuta l'elaborazione tridimensionale dei piani di base. La macchina utilizzata è una Canon Power Shot 1 a 8 megapixel. In questa fase è stata fissata la scala e il sistema di riferimento che sono stati adottati in tutti i test sperimentali. I punti per la definizione dei piani di base sono stati ottenuti fotogrammetricamente con il software *Australis*, ed elaborati con software *GIS* (Figura 4.6).

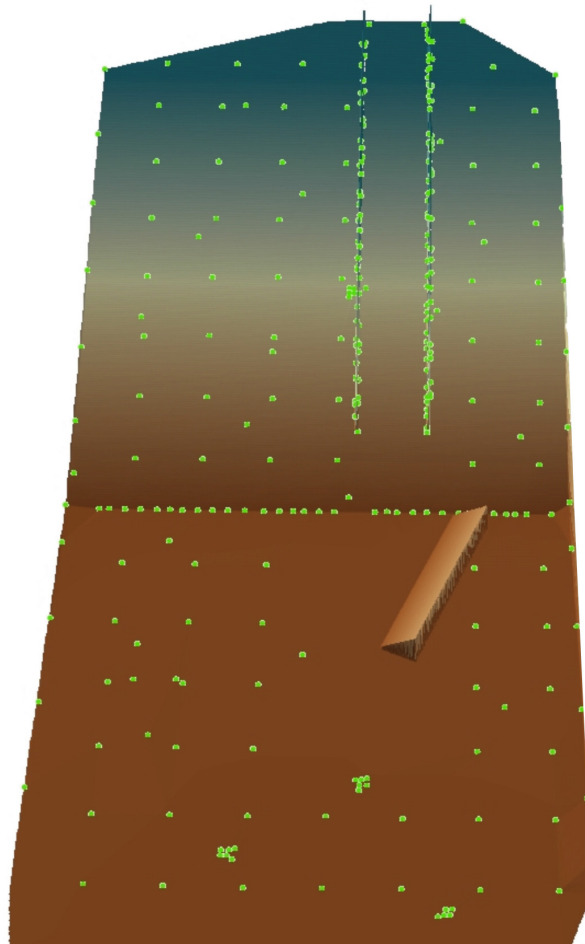


Figura 4.6: Punti esportati nel software Arcmap per la ricostruzione 3D dell'apparato sperimentale.

4.3.1 Il settaggio della scala

Con il software Australis, si possono sfruttare quattro metodi per ottenere una scala corretta dello spazio oggetto di interesse, ad esempio utilizzando dei target appositi, oppure un database di scale predefinite, oppure assegnando delle distanze tra coppie di punti o tra le posizioni delle videocamere, [8]. La predisposizione di alcuni target retroriflettenti sui 2 piani di base della canaletta ha consentito di definire la scala della stessa.

Settaggio automatico grazie ai target retroriflettenti

Dal momento che il software utilizza dei target codificati di dimensioni note, è possibile assegnare una scala nello spazio oggetto basata sulla distanza esistente tra i punti posizionati sul target. Ogni target presenta una disposizione dei punti unica (Figura 4.7). Il diametro di ogni punto autoriflettente è di 6 mm . La distanza sulla quale si basano i target, nella definizione della scala, è molto piccola, così da poter garantire minore accuratezza sulla media distanza. Può risultare quindi importante affiancare a questo metodo automatico, un secondo approccio che possa fornire un riscontro, ed eventualmente un incremento dell'accuratezza sulla media distanza, come descritto nel paragrafo successivo.

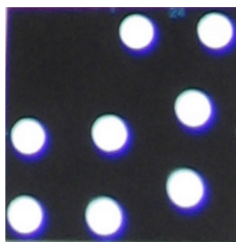


Figura 4.7: Esempio di target autoriflettente e disposizione dei punti di riconoscimento.

Settaggio della scala grazie a distanze conosciute

L'acquisizione di un numero consistente di punti è stato ottenuto grazie alla distribuzione omogenea di marker sui piani, i quali, assieme ai target costituiscono i punti di riferimento con coordinate X , Y e Z note (Figura 4.8). Il riconoscimento manuale dei punti suddetti nel set di immagini acquisite ha consentito di creare le superfici tridimensionali dei piani di valle e di monte. Per settare una corretta scala è possibile assegnare un valore di distanza tra 2 o più punti. La scala finale sarà la media pesata dei valori di distanza inseriti. La combinazione delle 2 metodologie fornisce maggiore accuratezza nella definizione tridimensionale dei punti e consente di minimizzare l' RMS globale. L' RMS globale nello spazio immagine, risulta di $0.32 \mu m$ nelle 28 immagini inserite per la restituzione fotogrammetrica.

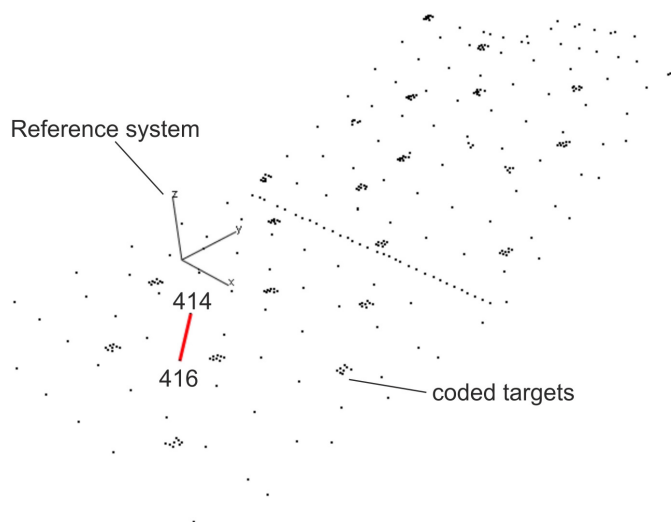


Figura 4.8: I coded target e le distanze tra i GCP sono i riferimenti per scalare correttamente il sistema fisico costituito dal piano di monte e dal piano di valle. Per garantire una separazione netta tra i 2 piani si è optato per l'individuazione di una serie di punti in corrispondenza del cambio di pendenza.

4.3.2 L'assegnazione del sistema di coordinate XYZ

All'elaborazione fotogrammetrica può essere assegnato un sistema di riferimento cartesiano XYZ arbitrario. Di default il software assegna l'origine del sistema di riferimento alla prima immagine orientata relativamente, e il suo piano XY viene allineato col piano focale della videocamera. Nelle sperimentazioni il sistema di riferimento è stato posizionato sul piano di valle, più o meno in corrispondenza dell'arresto del fronte principale del materiale. In questa maniera, in ogni test, la quota 0 corrisponde, approssimativamente, alla quota d'arrivo del materiale granulare. Il processo di assegnazione dell'origine e orientazione del sistema di riferimento viene chiamato *3-2-1 process*. Dapprima viene selezionato il punto per la definizione dell'origine, poi un punto attraverso il quale passi l'asse X e per ultimo l'asse Y : viene così definito il piano XY . La direzione dell'asse Z può essere indicata in modo arbitrario verso l'alto o verso il basso.

La procedura può essere condotta sia automaticamente sfruttando 3 coded targets, oppure manualmente individuando 3 punti da selezionare opportunamente.

Assegnazione manuale del sistema di coordinate XYZ

Si rende necessaria l'individuazione di tre punti per la tracciatura degli assi X e Y sul piano di base inferiore, perpendicolari tra loro. I tre punti devono essere riconosciuti in alcune immagini almeno, e sottoposti preventivamente a processamento fotogrammetrico. Dopo aver completato la procedura le coordinate di tutti i punti e delle stazioni delle videocamere sono trasformate nel nuovo sistema di riferimento (Figura 5.4). La procedura adottata per la costruzione 3D del deviatore di flusso è stata analoga, mentre per quanto riguarda il cono di rallentamento, la sua superficie curva ha suggerito l'adozione di un metodo alternativo, sfruttando il software Photoscan Agisoft.

4.4 Valutazione di qualità e sommario dei risultati

Il *bundle adjustment* è quella tecnica matematica che consente la definizione di un certo numero di punti con la relativa posizione nello spazio tridimensionale. Il software *Australis* aggiorna in automatico l'orientazione fotogrammetrica e le coordinate dei punti oggetto attraverso il bundle adjustment ogni qualvolta avvenga l'inserimento di un nuovo punto. Il criterio di valutazione dell'errore, viene parallelamente accostato alla restituzione fotogrammetrica. La soluzione statistica fornisce in output il numero di immagini impiegate rispetto a quelle scartate, il numero di punti accettati o che vengono rigettati, a causa dell'insufficiente accuratezza degli stessi.

Vengono fornite inoltre alcune informazioni metriche utili, quali il numero di iterazioni, il parametro RMS in μm delle coordinate immagine, il numero minimo di raggi assegnati al riconoscimento di ogni punto, il limite di rigetto dei punti assegnato e il numero di punti scartato. Per ottimizzare il risultato finale, è utile lavorare soprattutto sul *minimum number of rays*, e sul *rejection limit*. Il numero minimo di raggi è stato scelto pari a due, il *rejection limit* è stato abbassato fino a $0.50 \mu m$. Sta all'abilità dell'operatore riuscire a ottimizzare queste due variabili, cercando di mantenere un adeguato numero di punti associato ad elevata accuratezza. Prima di procedere con l'esportazione dei punti referenziati è quindi necessario verificare l'accuratezza dell'intero processo fotogrammetrico. La

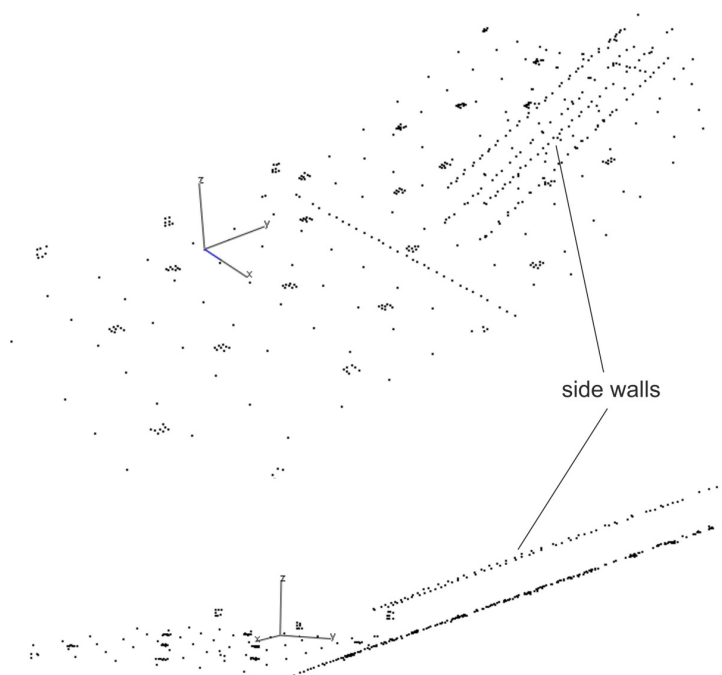


Figura 4.9: La restituzione fotogrammetrica delle 2 sponde laterali di contenimento del flusso, posizionate sul piano di monte, sono state ottenute posizionando dei tie points, riconoscibili nelle immagini, sugli spessori superiori. Il collegamento con il piano di base è stato completato con tecniche GIS.

descrizione dei parametri principali di valutazione generale ed alcuni dati riferiti alle 28 immagini utilizzate sono visualizzati in Figura 6.

	Included	Rejected
Cameras	1	
Stations	28	0
Points	390	73

Process summary:	Complete	
Iteration:	7	
RMS (microns):	0.32	
Minimum number of rays:	3	
Rejection limit (microns):	0.50	
Rejected observations:	2762	
248 points, 18 codes, 124 code bits Bundle sigma0: 2.848		
Setup	Close	Run

Image	Points	Rejected Pts	RMS (microns)
IMG_3235.JPG	156	80	0.23
IMG_3242.JPG	179	93	0.24
IMG_3243.JPG	167	95	0.21
IMG_3244.JPG	181	99	0.28
IMG_3245.JPG	179	71	0.21
IMG_3246.JPG	175	99	0.21
IMG_3247.JPG	156	102	0.28
IMG_3248.JPG	185	85	0.26
IMG_3249.JPG	195	101	0.25
IMG_3250.JPG	168	97	0.23
IMG_3251.JPG	161	90	0.22
IMG_3253.JPG	175	106	0.21
IMG_3255.JPG	157	89	0.22

Figura 4.10: Alcuni parametri di valutazione dell'accuratezza nella misura dei punti utilizzati per definire la base fisica sulla quale verranno effettuati i test sperimentali. La videocamera utilizzata è una Canon Power Shot 1 a 8 megapixel.

Measurement Network			
Number of images:	28		
Number of referenced points:	390		
Number of cameras:	1		
Quality of geometry:	1.0		
Minimum number of points on an image:	91	on image	IMG_3272.JPG
Minimum point intersection angle:	5 degs	for point	CODE55_5
Number of points referenced on:			
2 images only	0		
3 or more images	390		
4 or more images	300		
6 or more images	152		
Measurement Accuracy Summary			
Scale set?	Yes		
Estimated accuracy of 3D point coordinates (RMS 1-sigma level)			
X	0.0722	mm, or	1:45200
Y	0.1205	mm, or	1:27100
Z	0.0688	mm, or	1:47500
Overall	0.0872	mm, or	1:37400
Estimated accuracy of image referencing	0.12	pixels (RMS 1-sigma level)	

Figura 4.11: Alcuni parametri di valutazione dell'accuratezza dei punti che andranno poi a costituire la base fisica sulla quale verranno effettuati i test sperimentali.

Le informazioni relative alla qualità del lavoro svolto sono contenute nel sommario (Figura 4.11). Si nota come sia stata settata la scala, e come la deviazione standard (*RMS 1-sigma level*) per X , Y , Z sia 0.072 mm , 0.121 mm , 0.069 mm . Viene anche elencata l'accuratezza relativa, intesa come accuratezza interna alla triangolazione fotogrammetrica, che risulta pari a 0.12 pixel (*RMS 1-sigma level*), il che suggerisce un'accuratezza di $0.3\ \mu\text{m}$ circa per la misura delle coordinate immagine nel progetto.

4.5 L'elaborazione del sistema fisico

La fase preliminare ha avuto come scopo principale quello di riprodurre fotogrammetricamente la base del sistema fisico, costituito da due piani a differente inclinazione, due sponde laterali poste sul piano di monte disposte perpendicolarmente ad esso e distanziate di 20 cm, un cono di rallentamento ed un deviatore di flusso posto allo sbocco sul piano di valle con angolo di rotazione di 25° rispetto alla direzione di flusso. Tutti i punti, riferiti al sistema cartesiano predisposto, vengono elaborati sfruttando i numerosi tool di Arcgis (Figura 4.12). La quota minima riferita al punto di coordinate (0, 0, 0), origine del sistema di riferimento, è -4.6 mm , mentre la quota massima è di 697 mm .

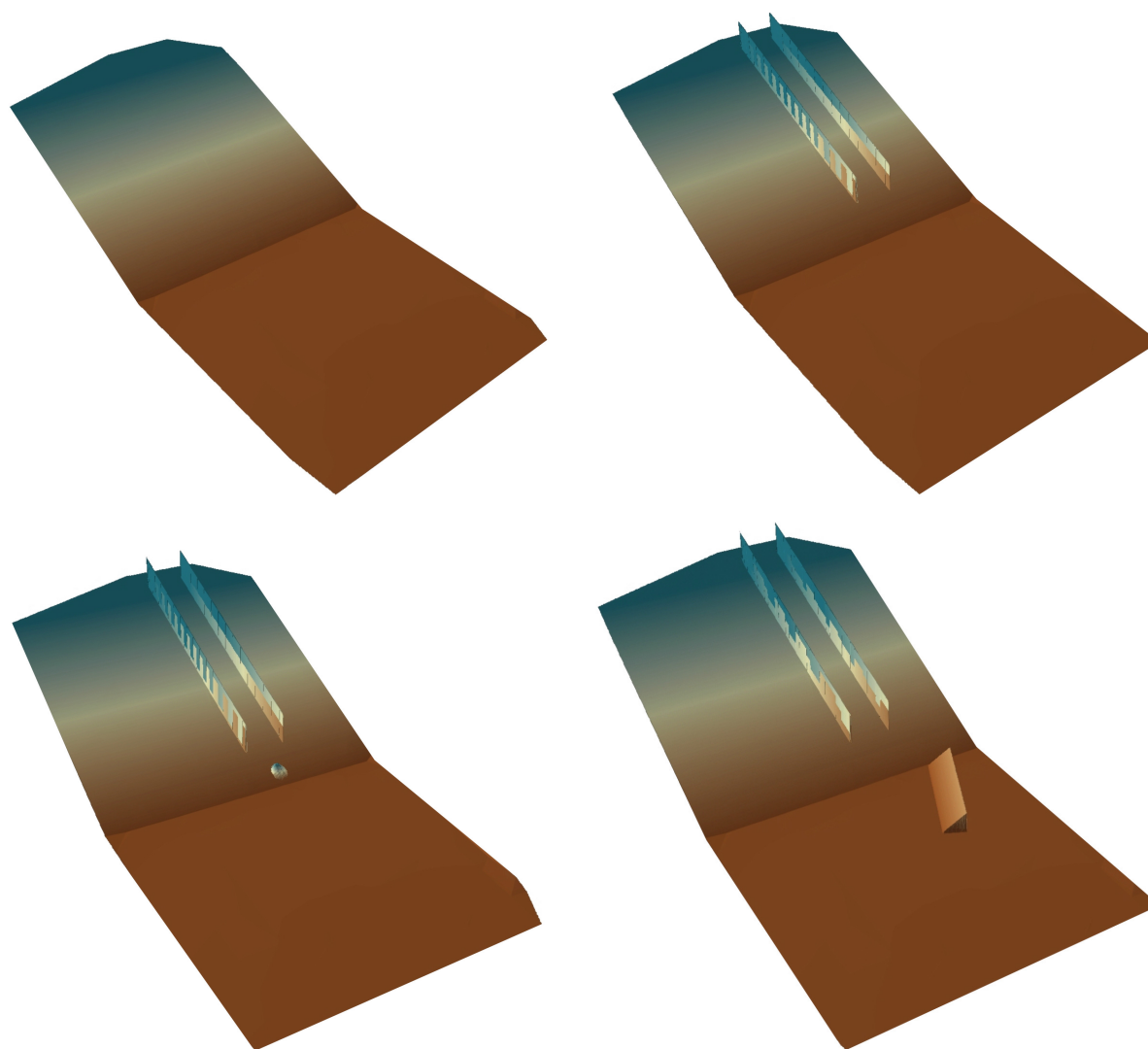


Figura 4.12: Le 4 configurazioni del sistema sperimentale dove si sono svolti i test sperimentali: pendio aperto, flusso incanalato, flusso incanalato con utilizzo di cono di rallentamento, flusso incanalato con deviatore ruotato di 25 gradi e inclinato di 45 gradi. Il piano di monte è stato posto ad un'inclinazione di 27.5 gradi sull'orizzontale, il piano di valle di 6.5 gradi. Per le prove sperimentali si utilizzano 2 materiali granulari con diverse caratteristiche reologico-attrittive, di forma e distribuzione granulometrica.

4.6 Ricostruzione multi-image 3D con Photoscan

Negli ultimi anni sono state sviluppate soluzioni numeriche per la fotogrammetria basate sugli algoritmi Structure-From-Motion (*SFM*) e Dense Multi-View 3D Reconstruction (*DMVR*). Il metodo *SFM* utilizza un numero più o meno grande di immagini che cattura una scena da punti di vista arbitrari, e cerca di recuperare i parametri delle camere e di trovare una nuvola sparsa di punti che rappresenti la geometria 3D dell'oggetto. Il metodo individua le caratteristiche corrispondenti nelle diverse immagini nella zona di sovrapposizione, per il calcolo dei parametri interni ed esterni della camera [35]. Molti sistemi fanno utilizzo del metodo *bundle adjustment* per migliorare l'accuratezza nel calcolo della traiettoria delle macchine digitali o delle videocamere e per minimizzare l'errore. Snavely et al., hanno proposto un metodo che permette l'esplorazione di immagini organizzate nello spazio 3D utilizzando Bundler, un programma *SFM* open source. Un software simile, è offerto dalla Microsoft ([31]). Il progetto EU, 3D-COFORM ha implementato un sistema *SFR – DMVR* web-service. Sistemi simili sono stati creati da Autodesk ([9]), Vitzu Technologies ([41]), e Acute3D.([6]).

Altre compagnie offrono software con soluzioni basate sulla ricostruzione 3D da immagini come applicazioni standalone, non collegate via web: Photomodeler Scanner è un esempio ([24]). Il software è in grado di costruire una nuvola di punti con l'aiuto di alcuni target. Il software *Agisoft Photoscan* agisce nella stessa direzione. Questo software ha la particolarità di unire le immagini a diversa profondità e di produrre un'unica nuvola di punti in scala di grigio, che può essere convertita in una mesh 3D a differente densità ([25]). Queste tipologie di software sono state testate più volte per la verifica di accuratezza, soprattutto in campo archeologico, e confrontate anche con altre tipologie di misurazione, come il laser scanner, dimostrando un buon rapporto qualità/prezzo ([44]).

4.6.1 Generazione del modello 3D

I metodi *SFM – DMVR* richiedono una larga disponibilità di memoria e processori potenti, per la risoluzione dei problemi legati alla ricostruzione tridimensionale. Il computer utilizzato per le elaborazioni è un sistema Microsoft Windows 7 a 64 bit, con processore 8 Core Intel (R), I7-2600k, 3.40 GHz, 8 GB di RAM. Si è fatto uso dell'edizione standard (versione 9.0) del software Agisoft Photoscan.

Una volta che l'utente fornisce al software le immagini, il software provvede ad una calibrazione sulla base delle informazioni *EXIF* (lunghezza focale, apertura, *ISO*, shutter, dimensioni sensore *CCD*). Se i dati *EXIF* sono insufficienti per estrarre i valori di calibrazione delle videocamere, viene assegnata una lunghezza focale di 50 mm, la quale può differire molto dalla reale lunghezza focale e comportare quindi un allineamento errato dei punti. Si rende quindi necessaria una calibrazione a priori nella maggior parte dei casi, specialmente quando la distorsione è troppo elevata e le informazioni *EXIF* sono insufficienti.

La calibrazione delle videocamere e il fissaggio di tutti i parametri relativi di distorsione, consente l'allineamento delle videocamere nello spazio tridimensionale (Figura 4.13), producendo un'unica e completa mesh 3D, utilizzando un algoritmo di ricostruzione multi-view ([36]).

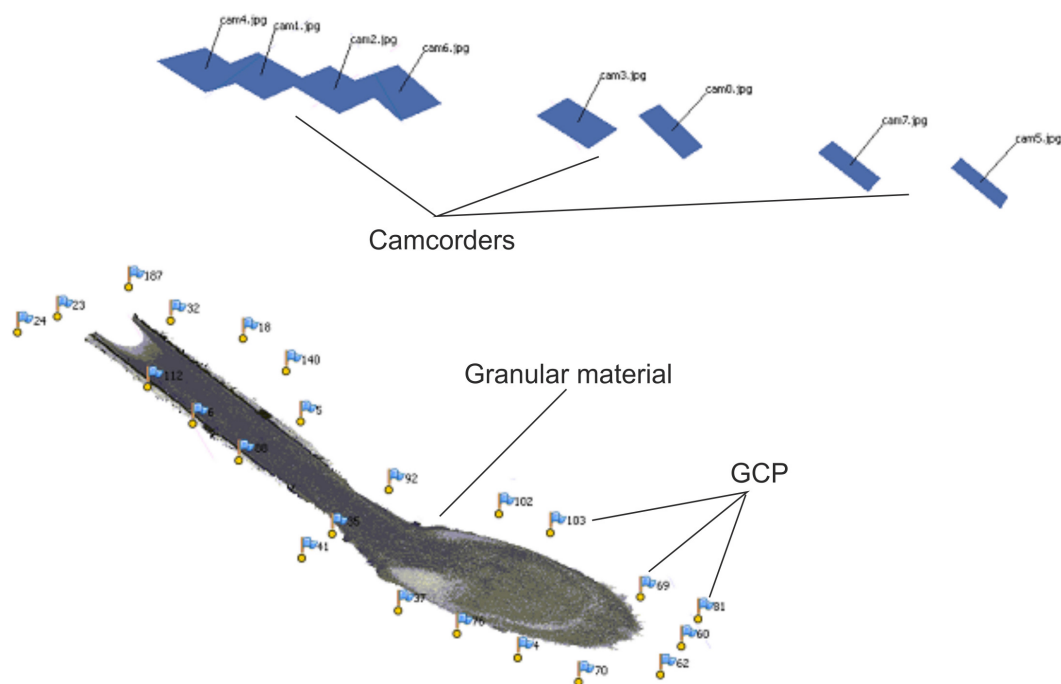


Figura 4.13: Le 8 videocamere presentano caratteristiche ottiche diverse l'una dall'altra, anche in termini di lunghezza focale. La calibrazione dei parametri di orientamento interno ottenuta con Australis, consente l'allineamento delle videocamere utilizzate e agganciate alla struttura di supporto posta al di sopra del sistema fisico.

Il software consente l'utilizzo di diversi livelli di dettaglio per la ricostruzione 3D. IL livello di dettaglio *LOD* influenza la densità di triangoli con la quale avviene la ricostruzione delle mesh. Tranne rari ed isolati casi, la densità di punti ottenuta sulla superficie granulare ha consentito un *LOD* high o ultra-high. Il colore delle mesh viene assegnato ai suo vertici, per questo più la densità delle mesh è alta, maggiore è la qualità di dettaglio del colore. Inoltre, *Photoscan* è in grado di produrre mesh testurizzate, miscelando parti delle immagini di origine, in modo da ottenere un risultato realistico e a bassa complessità delle mesh tridimensionali. Aumentando il numero di immagini e il *LOD*, aumenta notevolmente il tempo macchina di ricostruzione tridimensionale. Nella configurazione sperimentale, ogni analisi fotogrammetrica dinamica viene eseguita con un numero massimo di immagini pari ad otto, limitando il tempo di elaborazione, anche con computer dotato di prestazione non eccelsa. In generale, vale comunque la regola che il tempo di processamento delle immagini è superiore al tempo richiesto per l'acquisizione del dato, nel nostro caso effettuata in laboratorio.

Al fine di ridurre il processo di ricostruzione 3D della scena, si è fatto uso del tool di mascheramento offerto dal software, il quale consente di eliminare le aree che non sono di interesse. L'approccio metodologico permette di eliminare tutte le zone esterne allo scorrimento del materiale, essendo il sistema fisico già predisposto, secondo le diverse configurazioni (Figura 4.14).

I vari esperimenti eseguiti negli ultimi anni, hanno contribuito a verificare che il modello *SFM - DMVR* non sviluppa errori proporzionali alla distanza considerata. I metodi *SFM - DMVR*, inoltre, non sono in grado di ricostruire adeguatamente porzioni di

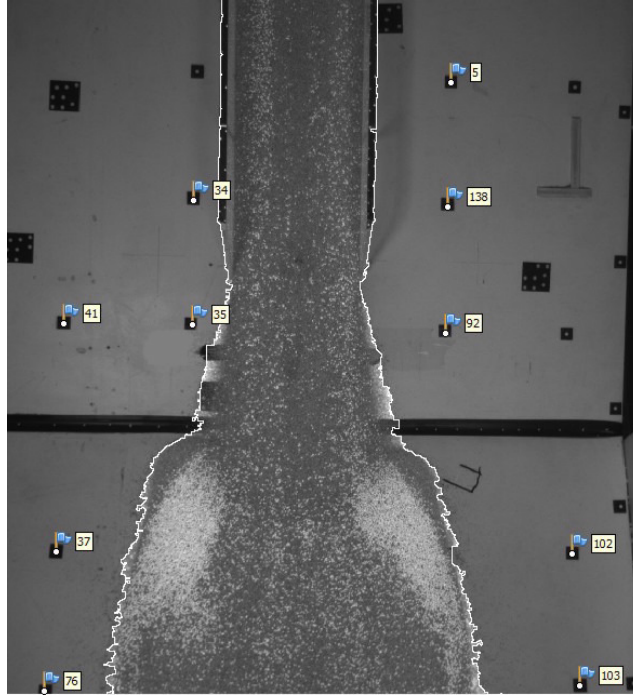


Figura 4.14: L'opzione mask consente di considerare soltanto l'area occupata dal materiale, garantendo un minor dispendio in termini di tempo e migliorando la qualità della fase di elaborazione GIS.

area in cui si osserva bassa alternanza di colori, oppure scarsa illuminazione. In queste porzioni circoscritte, il risultato può essere sempre migliorato ponendo le videocamere a distanza inferiore, oppure sfruttando le diverse caratteristiche delle ottiche in funzione della distanza dalla superficie di riferimento. Gli illuminatori ad alta frequenza, appositamente predisposti anche per le motivazioni appena descritte, contribuiscono a determinare un'ottima illuminazione e ad innalzare la qualità di tutte le elaborazioni.

Così come nella tecnica fotogrammetrica classica *image-based*, i dati prodotti sono altamente correlati e dipendono dalla procedura di identificazione di punti omologhi nelle immagini. Inoltre i modelli 3D prodotti, evidenziano come i metodi *SFM – DMVR*, rappresentino un modello a basso livello di digitalizzazione e a bassa documentazione associati alla qualità dei modelli. La funzionalità semi-automatica del software costituisce una soluzione efficace che ha però il limite nel basso grado di controllo sui parametri dell'accuratezza associati al lavoro fotogrammetrico.

4.7 Elaborazione fotogrammetrica completa

La ricostruzione tridimensionale dell'ammasso granulare con tecniche fotogrammetriche dinamiche è stata fatta utilizzando il software *Photoscan*, il quale garantisce un alto numero di punti riconosciuti automaticamente (fino a più di 5000 punti), sulla superficie del materiale (Figura 4.15). Il *DTM* estratto viene sovrapposto al sistema fisico costituito dai piani inclinati, secondo le varie configurazioni. Le varie operazioni tra i livelli informativi ottenuti vengono svolte con il software *GIS*, attraverso il quale viene gestita la fase di post-processamento dei *DTM* ottenuti.

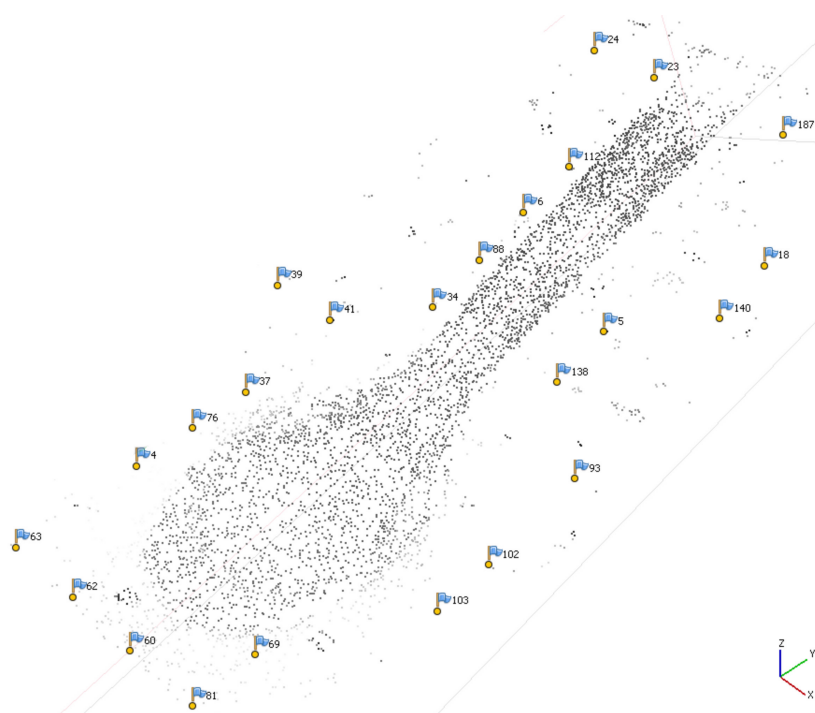


Figura 4.15: L'opzione align photos in *Photoscan* individua un certo numero di punti sulla superficie del materiale, funzione del contrasto di colori, dell'accuratezza della calibrazione delle videocamere, e del numero di immagini che riprendono una determinata area.

In particolare, l'operazione di unione tra il raster *DTM* in output di *Australis* e il raster *DTM* in output di *Photoscan* si ricava da Arctoolbox Data Management tool → Mosaic to new raster. Il tool, oltre ad unire assieme i due *DTM*, fornisce l'opzione di scelta della superficie in output nelle zone di sovrapposizione.

Essendo l'evoluzione della superficie topografica ciò che si desidera e non il piano di base, si opterà per l'opzione maximum in mosaic method. Il valore della cella in output delle aree di sovrapposizione, sarà il valore massimo delle celle sovrapposte.

Per tutti i test sperimentali la dimensione della cella del nuovo raster è compresa tra 1.5 mm e 1.7 mm, mantenendo quindi inalterato il valore automaticamente proposto da software *Photoscan* in high *LOD*.

Uno schema riassuntivo dell'approccio metodologico sperimentato viene presentato in Figura 4.16.

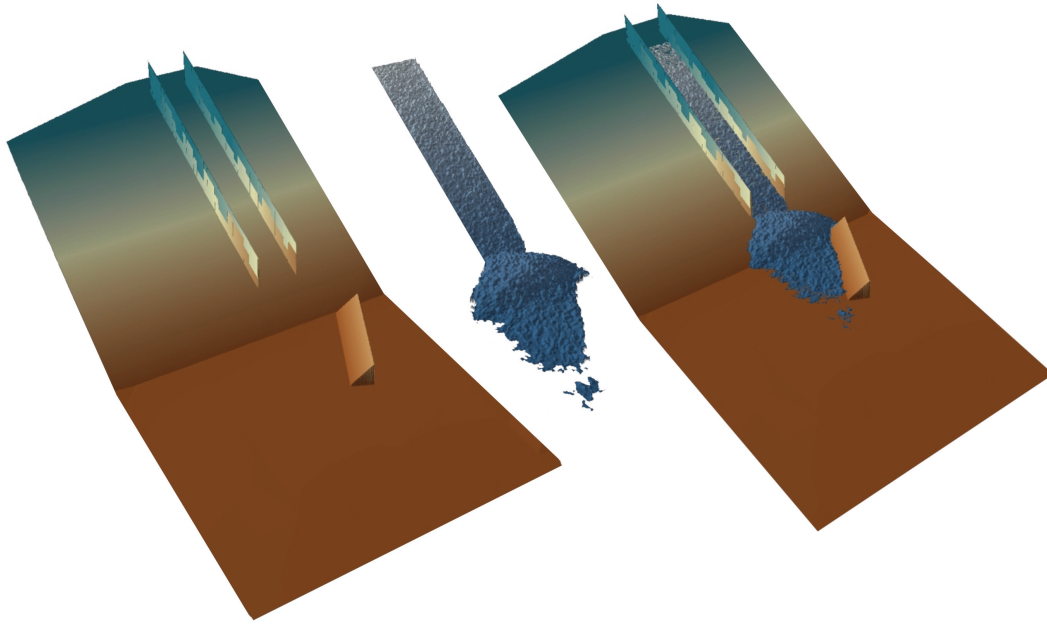


Figura 4.16: Schematizzazione delle fasi che portano alla descrizione topografica superficiale delle componenti sistema fisico + materiale granulare. In figura viene mostrato un preciso istante di tempo del materiale in movimento.

4.8 Conclusioni

L'obiettivo della definizione topografica in fase dinamica di un ammasso granulare in movimento è stato raggiunto sfruttando in sequenza 3 software: 2 per le elaborazioni fotogrammetriche, e *Arcgis* per la fase di post-processing.

Il software *Australis*, presenta il vantaggio della possibilità di un ampio controllo manuale da parte dell'operatore, sia nella fase precedente alla elaborazione fotogrammetrica che in fase di controllo dei parametri statistici di accuratezza della restituzione. Si è dimostrato particolarmente adatto per la definizione dei piani di base del sistema fisico impiegato.

Il software *Photoscan* sfrutta algoritmi diversi e, accanto ad una efficace automatizzazione nella ricerca e definizione dei punti omologhi, associa un basso controllo manuale. Si è operato quindi in modo da sfruttare le qualità e le diverse proprietà dei 2 programmi, tenendo conto dei relativi limiti. In generale si è raggiunto un buon grado di automatizzazione nelle elaborazioni fotogrammetriche, anche se l'automatizzazione completa e totale è risultata impossibile. In particolare l'inserimento dei Control Points in *Photoscan* (punti referenziati ed esportati da *Australis*), ha richiesto una gran mole di lavoro e di tempo, sia per l'importanza del numero dei Control Points che ad ogni immagine sono stati assegnati (valore consigliato di 10 Control Points), sia per la precisione con la quale devono essere posti, per ridurre al minimo l'errore di posizionamento sull'immagine.

Capitolo 5

Attività di laboratorio

5.1 Introduzione

La valutazione dell'accuratezza delle operazioni fotogrammetriche è stata effettuata sia in considerazione del valore *RMSE* globale (a questo proposito è stato dedicato un capitolo per la descrizione dell'errore negli istanti di prova da ritenere rappresentativi per tutti i test sperimentali presenti nel lavoro di tesi), sia direttamente confrontando il valore visualizzato su di un etichetta graduata con l'output fotogrammetrico in corrispondenza della medesima sezione, sia indirettamente, cioè confrontando come varia l'andamento delle sezioni ricavate fotogrammetricamente variando il numero di videocamere impiegate per la restituzione fotogrammetrica.

Il margine di incertezza valutato quantitativamente sia in questo capitolo che precedentemente va tenuto in considerazione per tutti i test sperimentali e le relative elaborazioni. L'evoluzione tridimensionale dei *DTM* ha lo scopo di rendere definibile metricamente nello spazio e nel tempo ogni punto della superficie topografica del materiale favorendo l'acquisizione di informazioni fisico-reologiche e attritive e favorire le simulazioni matematico-numeriche dei test, in considerazione anche dei diversi materiali granulari impiegati.

5.2 Precisione delle misure

La verifica della precisione della metodologia adottata al fine di descrivere tridimensionalmente la topografia superficiale del materiale granulare in movimento lungo la canaletta a diversi istanti di tempo, è stata effettuata utilizzando esclusivamente le tecnologie già a disposizione, sfruttando cioè la sincronizzazione garantita dalla gestione hardware delle videocamere. In particolare, sono state poste 2 videocamere sul piano di monte nella zona di scorrimento dove il materiale scorre all'interno delle sponde con piano inclinato 27.5° (Figura 5.1). Sulla sponda trasparente prossima alle videocamere è stata posta una scala graduata centimetrica, in direzione normale rispetto al piano di monte.

La procedura sperimentale consiste semplicemente nel porre a confronto l'altezza del materiale zeolitico granulare, visualizzata sull'etichetta graduata e l'altezza ricavata attraverso la procedura fotogrammetrica nella stessa posizione. L'istante preso in analisi è circa dopo un secondo dal rilascio del materiale. Le videocamere utilizzate sono ad una distanza dalla sponda, tale da ridurre l'effetto di parallasse al minimo.

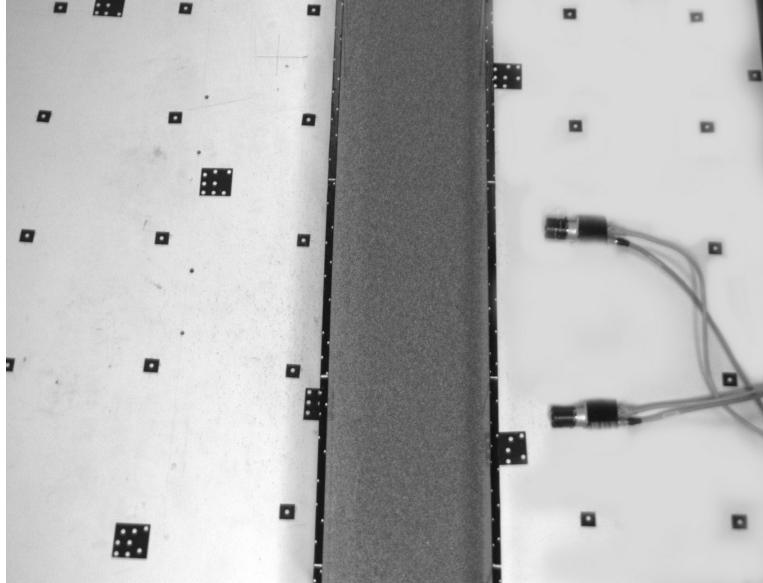


Figura 5.1: Posizionamento delle 2 videocamere in zona di scorrimento del materiale a distanza di circa 50 cm l'una dall'altra.

La parallasse è lo spostamento apparente tra un oggetto vicino rispetto ad un oggetto distante se visti secondo prospettive differenti.

In metrologia, l'errore di parallasse è l'errore di misurazione che viene commesso durante la lettura della coincidenza di un indice con una scala graduata quando l'indice è discosto dal piano della scala. In tal caso l'indice si proietta in punti diversi della scala secondo la posizione dell'occhio dell'osservatore, con un errore corrispondente. È quindi auspicabile che la distanza della videocamera dalla scala graduata non sia troppo piccola e il più possibile frontale rispetto alla posizione della stessa. L'errore di parallasse dovuto alla distanza tra il materiale e la scala graduata può essere dell'ordine del millimetro.

In fotogrammetria invece viene definita parallasse la distanza tra 2 raggi proiettivi omologhi, misurata su di un piano parallelo al piano XY . Essa viene distinta in 2 componenti: px parallela alla base di presa e py ad essa perpendicolare. La parallasse varia al variare del piano su cui essa viene misurata, fino a raggiungere un valore minimo. Se i 2 raggi omologhi sono complanari, questi valori sono pari a 0 (i 2 raggi ad un certo punto si incontrano); in caso contrario la distanza minima è perpendicolare alla base di presa, all'incirca in direzione dell'asse Y (parallasse trasversale). Se in un punto la parallasse trasversale è nulla, i raggi omologhi sono complanari (Figura 5.2). L'eliminazione delle parallasse avviene durante la fase dell'orientamento relativo prevista per il piazzamento dei fotogrammi.

Il posizionamento delle sezioni è visualizzato in Figura 5.3.

L'effetto della distorsione radiale, comunque evidente, specialmente con le videocamere con focale 6 mm utilizzate per la prova, non influenza la corretta lettura dell'altezza del materiale. L'effetto superficiale della luce sul materiale così come la maggior altezza del materiale al centro della zona di scorrimento (quest'ultima in misura inferiore), può influenzare la corretta lettura del valore.

Il sistema di riferimento adottato nell'elaborazione fotogrammetrica è stato posizionato per semplicità sul piano di valle in corrispondenza del fronte del deposito del materiale

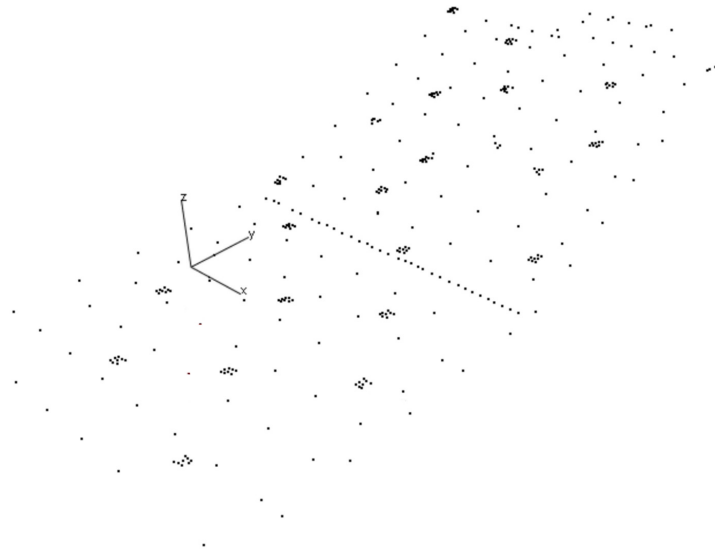


Figura 5.4: Sistema di riferimento sul piano di valle della sistema sperimentale.

negli istanti finali della prova sperimentale. Mentre però, per quanto riguarda il software fotogrammetrico, le distanze lungo x e y vengono misurate correttamente, questo non succede nei comuni software *GIS*. I tool per effettuare delle sezioni lavorano solo bidimensionalmente e forniscono quindi un valore di distanza non corretto. Questo succede, nel nostro caso specialmente in direzione di y , mentre lungo x l'errore non è così evidente perchè le sezioni da noi considerate coincidono perlopiù con la x nel sistema di riferimento adottato (Figura 5.4).

Si è comunque deciso di porre rimedio sfruttando dei tool appositi e alcuni semplici passaggi. L'ultimo accorgimento sul quale è necessario porre l'attenzione è tenere presente che la lettura sulle sponde laterali avviene perpendicolarmente al piano di monte mentre il tool *arcgis* per la costruzione delle sezioni lavora lungo l'asse delle z . Risulta quindi necessario compiere una semplice operazione trigonometrica per riportare le altezze allo stesso riferimento.

5.2.1 Materiale granulare zeolitico

In questo capitolo si vuole capire quanto l'analisi fotogrammetrica, attraverso l'utilizzo del software prescelto, possa avvicinarsi alla definizione reale dell'altezza del materiale, attraverso un confronto puntuale. Non solo, in considerazione del fatto che la predisposizione delle videocamere sulla struttura di supporto garantisce una sovrapposizione sui 2 piani del sistema sperimentale, variabile da 2 a 5 generalmente, si è voluto valutare la variazione del risultato fotogrammetrico ottenuto con un diverso numero di videocamere impiegate. Si valuterà infine la variazione laterale del profilo superficiale in corrispondenza delle sezioni prese in esame, sempre al variare del numero di videocamere impiegate per la restituzione fotogrammetrica. Questa analisi verrà effettuata con 2 livelli di accuratezza diversi per stimare le variazioni dei profili stessi. L'accuratezza può essere incrementata:

- ottimizzando la posizione dei punti di controllo sulle immagini, in modo da minimizzare l'errore in pixel nelle diverse immagini;

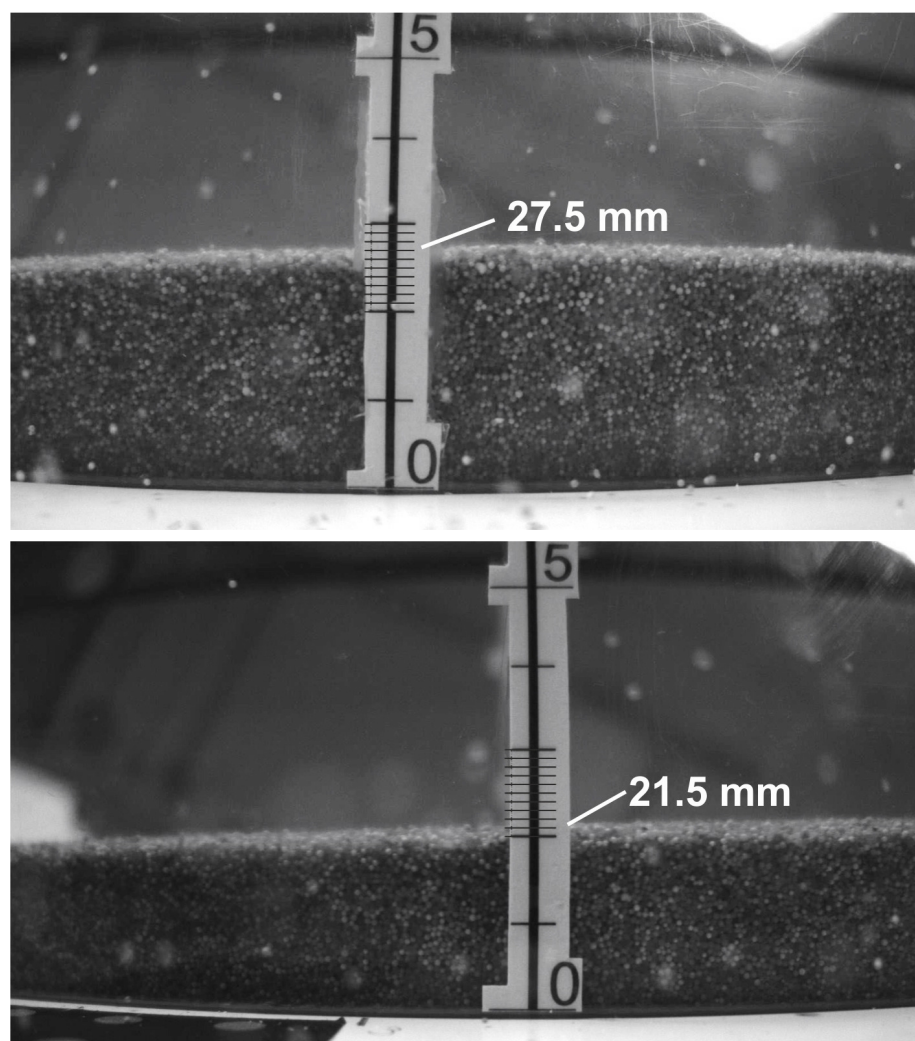


Figura 5.5: Valori di altezza relativi alla sezione di monte (figura in alto) e di valle (figura in basso).

- eliminando i punti che mostrano un errore sistematico elevato rispetto al valore medio degli altri punti di controllo;
- utilizzando la funzione optimize del software Photoscan.

Photoscan stima infatti i parametri di orientamento interno ed esterno delle videocamere durante l'allineamento delle immagini. Questa stima viene effettuata utilizzando soltanto i dati provenienti dalle immagini, e ci possono essere degli errori nella stima finale. L'accuratezza della stima finale può dipendere da numerosi fattori, come la sovrapposizione tra le immagini, o la forma superficiale dell'oggetto analizzato. Queste deformazioni possono portare a deformazioni non lineari del modello finale.

Durante la georeferenziazione il modello viene trasformato linearmente utilizzando 7 parametri di trasformazione. (3 parametri per la traslazione, 3 per la rotazione, ed 1 per la scala). Tali trasformazioni possono compensare soltanto un disallineamento lineare del modello. La componente non-lineare non può essere rimossa con questo approccio. Generalmente questa è la ragione principale degli errori nella georeferenziazione. Le possibili deformazioni non lineari del modello possono essere rimosse ottimizzando la nuvola

di punti stimata e i parametri delle videocamere, basati sulle coordinate di riferimento conosciute. Con la funzione optimize Photoscan aggiusta le coordinate dei punti stimati e i parametri delle videocamere, minimizzando la somma dell'errore tra il punto misurato e quello calcolato dal software e il disallineamento delle coordinate di riferimento (*GCP*).

Il materiale zeolitico mostra un'altezza all'istante considerato di $27.5 - 28$ mm circa a monte e $21.5 - 22$ mm presso la sezione di valle (Figura 5.5).

Le sezioni sono state tracciate con l'ausilio del software Arcmap, cercando di avvicinare il più possibile la sezione alla posizione in corrispondenza della quale si trova l'etichetta graduata.

Il confronto puntuale effettuato sul contatto destro della sponda con il materiale zeolitico, evidenzia un errore generalmente contenuto, con un massimo del 9% circa derivanti dall'utilizzo di 2 videocamere nella sezione di monte (Tabella 5.1). È importante tenere in considerazione il fatto che il confronto è puntuale e può non essere rappresentativo della correttezza generale della restituzione tridimensionale nel suo insieme. La visione di tutta la sezione con i relativi profili dimostra infatti che a tratti in cui questi mostrano un andamento discordante, si alternano tratti in cui l'andamento è più omogeneo e concordante con poche differenze tra di essi.

La tendenza è comunque sempre a sovrastimare l'altezza reale. Le evidenze portano a considerare più affidabili le misure desunte dall'utilizzo di almeno 3 videocamere a parità di accuratezza nell'inserimento dei *GCP* e a parità di numero di *GCP* inseriti. La rugosità superficiale è evidente anche nei *DTM*, dove la sovrapposizione è tra 2 videocamere soltanto. L'errore percentuale è puramente indicativo, in quanto con ogni probabilità, fosse stata anche maggiore l'altezza del materiale, l'errore sarebbe stato di quell'ordine di grandezza, il termine percentuale sarebbe stato però inferiore.

Sia per la sezione di monte che per quella di valle sono state effettuate 2 prove con livello di accuratezza diverso nel posizionamento dei *GCP* (Tabella 5.1 e 5.2). Le sezioni di Figura 5.6 e 5.7 mostrano le diversità dell'andamento superficiale dei profili al variare dell'accuratezza con cui viene fatta l'analisi, secondo gli accorgimenti già prima descritti. L'andamento generale dei profili non mostra distinzioni così evidenti tra a) e b), tuttavia in b) l'andamento risulta maggiormente irregolare e localmente divergente rispetto all'andamento presumibilmente corretto.

Il software Photoscan ha come potenzialità quella del riconoscimento di un numero elevato di punti sulla superficie del materiale in modo automatico, motivo per il quale è stato scelto. Nel caso di materiale zeolitico però l'omogeneità del materiale associata allo scarso contrasto di luce, limita il numero di punti riconosciuti. D'altro canto il limite più grande è l'impossibilità di fornire manualmente tie points che possano essere georeferenziati attraverso il bundle adjustment. Il numero di punti non così elevato va a discapito della accuratezza generale delle misurazioni. Questo limite ha consigliato di inserire in seguito, all'interno del materiale zeolitico il tracciante bianco di dimensioni maggiori, con funzione di bersaglio mobile.

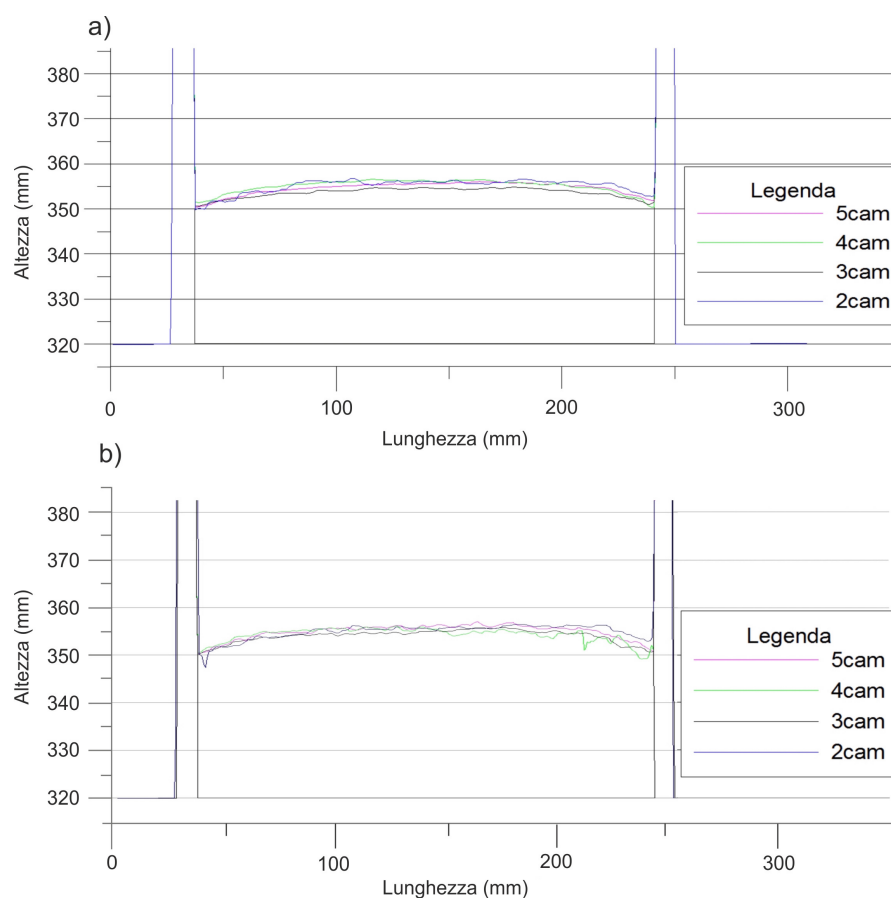


Figura 5.6: Andamento dei profili riferiti alla sezione di monte, utilizzando un diverso numero di videocamere. In a) vengono mostrati i profili risultanti dall'utilizzo della funzione 'optimize' e dalla rimozione degli errori non lineari. In b), l'accuratezza inferiore nell'analisi fotogrammetrica inficia l'accuratezza generale, e questo è ben visibile dall'andamento dei profili.

N cam	N immagini	N tie points	Errore GCP (pix)	Altezza sezione monte (mm)	Altezza sezione valle (mm)	Altezza sezione monte normale al piano (mm)	Altezza sezione valle normale al piano (mm)
2	2	239	0.423	30 - 32.8	22 - 22	30.6 (err.9.3%)	20.54 (err.4.5%)
3	3	505	0.592	30.6 - 31.4	23.2 - 23.1	29.3 (err.4.6%)	21.56 (err.0.3%)
4	4	909	0.742	31.4 - 30.3	24.1 - 23.3	28.3 (err.1%)	21.75 (err.1.2%)
5	5	1278	0.694	30.4 - 31.9	23.4 - 24	29.8 (err.6.4%)	22.4 (err.4.2%)

Tabella 5.1: Tabella riassuntiva dei dati di altezza in corrispondenza delle 2 sezioni in analisi. Il livello di accuratezza è descritto nella tabella dell'errore residuo RMSE. Si è fatto uso della funzione optimize.

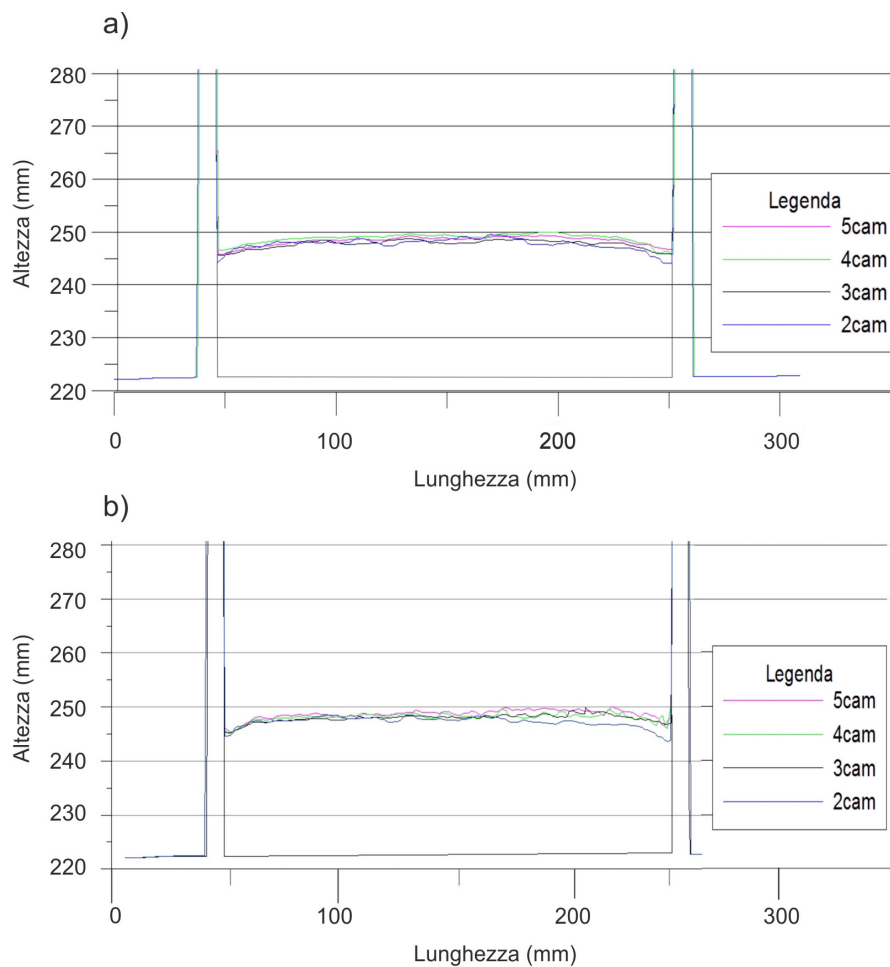


Figura 5.7: Andamento dei profili riferiti alla sezione di valle, utilizzando un diverso numero di videocamere. In a) vengono mostrati i profili risultanti dall'utilizzo della funzione 'optimize' e dalla rimozione degli errori non lineari. In b), l'accuratezza inferiore nell'analisi fotogrammetrica inficia l'accuratezza generale, e questo è ben visibile dall'andamento dei profili.

N cam	N immagini	N tie points	Errore GCP (pix)	Altezza sezione monte (mm)	Altezza sezione valle (mm)	Altezza sezione monte normale al piano (mm)	Altezza sezione valle normale al piano (mm)
2	2	259	3.247	31.2 - 31.8	22.4 - 22.9	29.9 (err.6.8%)	21.5 (err.0%)
3	3	599	2.92	29.7 - 28.8	23.7 - 23.6	27 (err.3.6%)	22.2 (err.3.2%)
4	4	963	2.822	30.6 - 30.8	23.6 - 24.1	28.9 (err.3.2%)	22.6 (err.5.1%)
5	5	1326	2.7	30.1 - 30.6	23.1 - 23.6	28.7 (2.5%)	22.2 (err.3.2%)

Tabella 5.2: Tabella riassuntiva dei dati di altezza in corrispondenza delle 2 sezioni in analisi. Il livello di accuratezza è descritto nella tabella dell'errore residuo RMSE. Non si è fatto uso della funzione 'optimize'.

5.2.2 Materiale granulare grossolano

Lo stesso procedimento descritto per il materiale zeolitico è stato adottato per la ghiaia grossolana. Partendo da un numero di 6 videocamere focalizzate sul materiale in discesa, nel tratto compreso tra le 2 videocamere laterali, si opera un confronto tra la sezione ottenuta dalle misure metriche con la misura letta sulla scala centimetrata; si procede poi con la stessa analisi diminuendo il numero di videocamere fino al numero minimo di 2.

L'utilizzo di materiale con tali caratteristiche, evidenzia un aumento notevole delle irregolarità superficiali, con alternarsi di spazi vuoti più o meno ampi, a tratti in cui i granuli trovano un giusto incastro tra di loro.

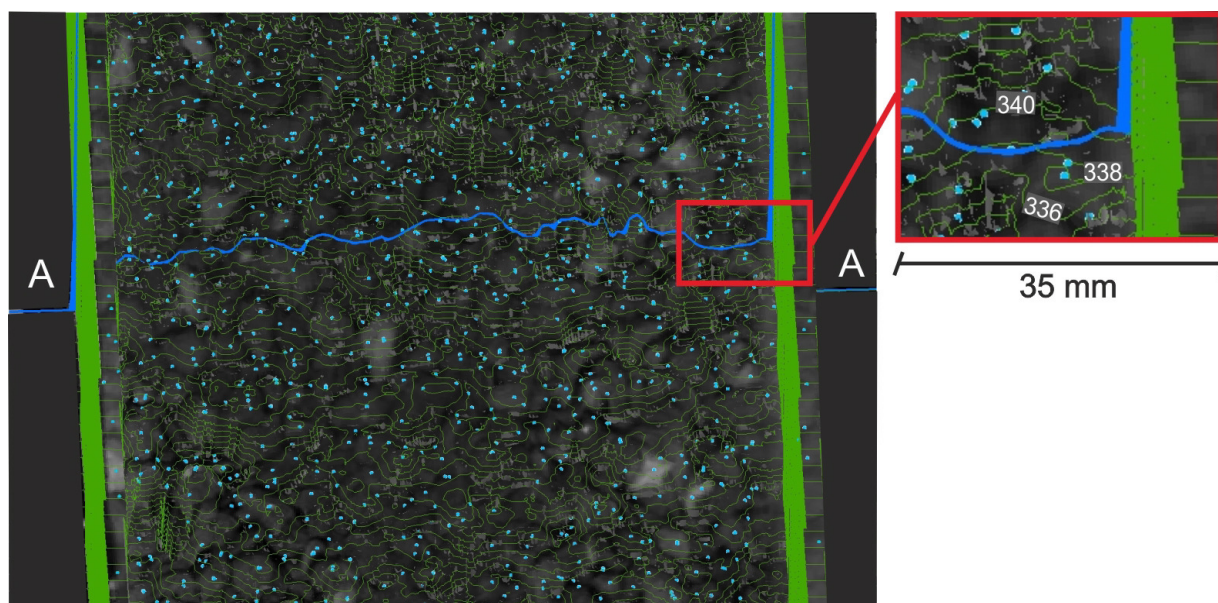


Figura 5.8: In figura è rappresentata la sezione A - A di monte spalmata sull'ortofoto ottenuta fotogrammetricamente. Nel riquadro rosso è visualizzata l'area che viene posta a confronto con il valore d'altezza letto sull'etichetta graduata. I punti rappresentano la nuvola fornita in output dal software fotogrammetrico. La densità di punti può ritenersi rappresentativa per la definizione topografica dell'ammasso granulare.

Il software individua una quantità di punti molto maggiore con questo tipo di materiale, a causa della spiccata rugosità superficiale e del marcato contrasto di luce superficiale. (Figura 5.8) Tuttavia la fedeltà della ricostruzione superficiale dell'andamento topografico è subordinata all'algoritmo implementato nel programma fotogrammetrico. Il numero di punti individuato è sì importante, ma non sufficiente a descrivere la forma di ogni singolo grano o dei vuoti che intercorrono tra di essi. Si può concludere affermando che l'alto numero di punti riconosciuto automaticamente favorisce l'accuratezza delle misurazioni, d'altro canto però, l'irregolarità superficiale determinata dall'utilizzo del materiale comporta necessariamente un effetto di smooth che va a levigare gli spazi intergranulari.

In Figura 5.10 e 5.11 sono rappresentate le sezioni in posizione A - A e B - B ad un generico istante t di tempo, elaborate con un numero decrescente di videocamere, e quindi di immagini, da 6 a 2. L'utilizzo del numero minimo di 2 videocamere sembra essere sufficiente per una restituzione fotogrammetrica che non si discosti dall'andamento

riscontrato utilizzando un numero maggiore di videocamere, anche se l'andamento del profilo risulta più irregolare (Tabella 5.3).

Anche in questo esperimento è stata condotta l'analisi per stabilire il grado di precisione (quantomeno in corrispondenza di una sponda), posizionando 2 videocamere lateralmente rispetto al deposito, frontalmente rispetto ad una scala centimetrata (Figure 5.9). Il confronto tra le misurazioni è plottato sulla normale al piano di monte, come nell'esperimento precedente. L'errore non supera 1.5 mm per la sezione di valle, mentre per quanto riguarda la sezione di monte il confronto risulta più problematico in considerazione del fatto che risulta di difficile rilievo la corretta altezza del materiale in corrispondenza della scala centimetrata. L'effetto di smooth operato dal software tende inoltre a ridurre le variazioni di altezza determinate dai grani rendendo parzialmente meno significativo questo tipo di verifica. Dai profili si evince come l'andamento dei profili sia più concordante nelle verifiche con il materiale grossolano rispetto all'andamento dei profili delle verifiche con materiale zeolitico. Il diverso numero di punti individuati fotogrammetricamente sulla superficie è in tal senso determinante.

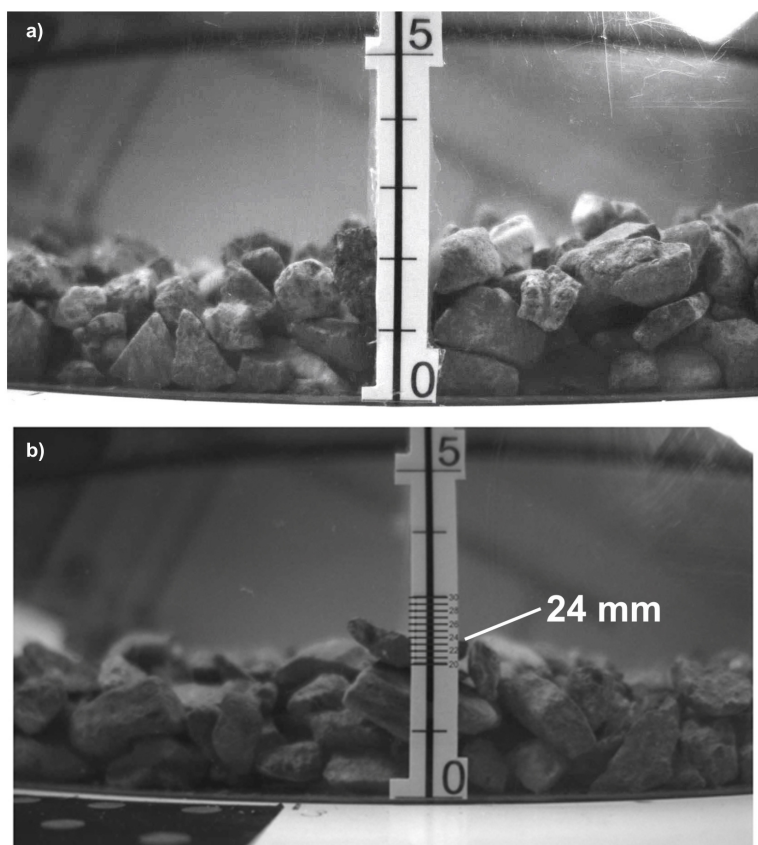


Figura 5.9: In a) figura relativa all'altezza del materiale in corrispondenza della sezione di monte, in b) l'altezza in corrispondenza della sezione di valle.

N cam	N immagini	N tie points	Errore GCP (mm)	Errore GCP (pix)	Altezza sezione monte (mm)	Altezza sezione normale al piano (mm)
2	2	1284	1.028	0.129	19.0	17.7
3	3	2275	2.174	0.785	19.4	18.1
4	4	2849	0.717	0.862	19.1	17.8
5	5	3886	0.764	0.789	20.0	18.7
6	6	4181	0.721	0.73	20.4	19.0

N cam	N immagini	N tie points	Errore GCP (mm)	Errore GCP (pix)	Altezza sezione valle (mm)	Altezza sezione normale al piano (mm)
2	2	1284	1.028	0.129	27.2	25.4 (err.5.4%)
3	3	2275	2.174	0.785	26.3	24.5 (err.2.1%)
4	4	2849	0.717	0.862	26.2	24.4 (err.1.7%)
5	5	3886	0.764	0.789	27.1	25.3 (err.5.4%)
6	6	4181	0.721	0.73	25.4	23.7 (err.1.1%)

Tabella 5.3: Le tabelle mostrano i dati relativi alla fotogrammetria nelle 2 sezioni di misura. L'altezza alla sezione di monte non è qui definibile con precisione, verosimilmente compresa tra 18 mm e 19 mm. L'altezza in corrispondenza della sezione di valle è di 24 mm circa.

5.3 Flusso ghiaioso in pendio aperto (Test 1)

La configurazione sperimentale ha previsto inclinazione del piano superiore di scorrimento di 27.5° , mentre il piano inferiore di arresto e deposizione risulta inclinato di 6.5° . Questa configurazione sarà una costante per la gamma di test sperimentali presa in analisi. La durata del test è di 2 s. All'interno dell'intervallo di tempo sono state definite metricamente 12 istantanee. Per il contenimento del materiale in configurazione di partenza si è utilizzata una forma tronco-conica, a base circolare (Figura 5.12). Il cono è stato ottenuto da una lamiera in acciaio dello spessore di 3 mm, opportunamente calandrata e saldata. Il sollevamento rapido del cono all'interno del quale viene posto il materiale granulare viene effettuato manualmente.

5.3.1 Analisi fotogrammetrica dei frames

Nella Tabella 5.4 si evidenziano alcuni dati caratteristici delle elaborazioni fotogrammetriche relative ai diversi frames considerati. Il tempo $t = 0$ ha come riferimento l'inizio della movimentazione del materiale, ed il contenitore conico viene sollevato verso l'alto. La risoluzione è poco più di 1 mm di lato, l'area di copertura indica la superficie planare occupata dal materiale, i tie points indicano il numero di punti individuati esclusivamente sulla superficie del materiale. La densità di punti per la costruzione del modello digitale del terreno, è funzione della distanza delle videocamere dalla superficie della canaletta sperimentale nonché della lunghezza focale delle videocamere che partecipano alla definizione tridimensionale del relativo frame.

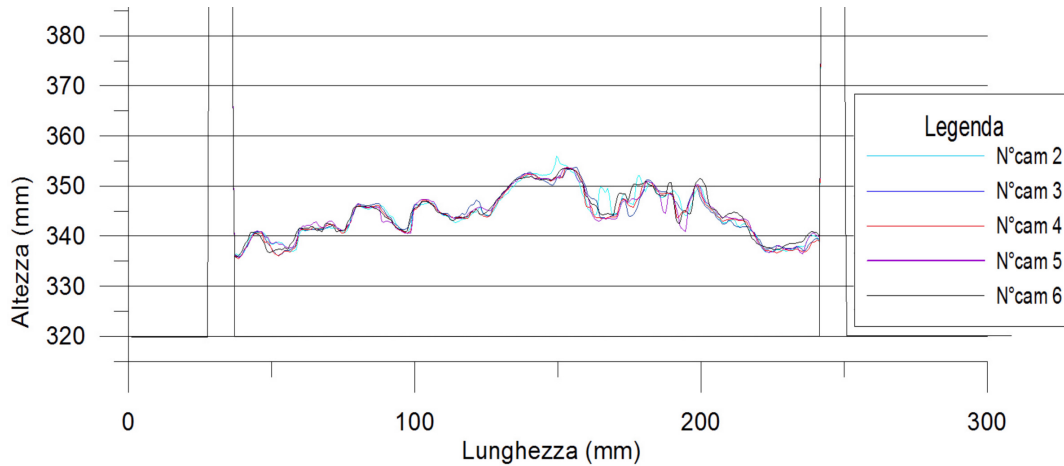


Figura 5.10: Andamento topografico dei profili riferiti alla sezione di monte ricavati fotogrammetricamente utilizzando un numero decrescente di videocamere.

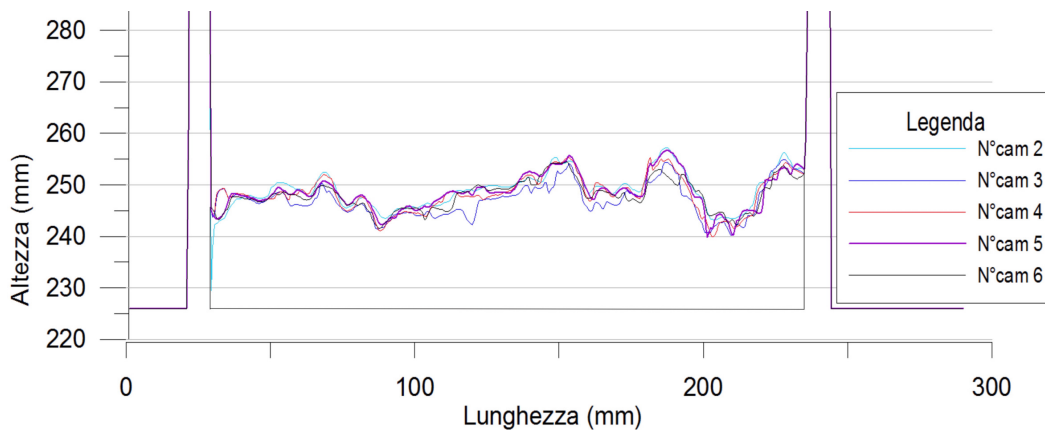


Figura 5.11: Andamento topografico dei profili riferiti alla sezione di valle ricavati fotogrammetricamente utilizzando un numero decrescente di videocamere.

La copertura delle videocamere sull'apparato sperimentale è evidenziata in Figura 5.13. I colori stanno ad indicare il numero di videocamere i cui raggi si vanno ad intersecare, e questo dipende dal *FOV* di ognuna di esse e dalla distanza dalla superficie della canaletta sperimentale. Sulla base del numero di videocamere disponibili si è optato per una maggiore definizione nella zona di scorrimento, dove il software ha mostrato segni di instabilità maggiori, soprattutto per quanto riguarda la ricostruzione della geometria, successiva al riconoscimento dei punti sulla superficie granulare. La presenza di 2 videocamere soltanto, necessita di una riduzione di errore nella collocazione manuale dei *GCP*, di un maggior numero di punti ben distribuiti attorno al deposito. Si limita così il deficit derivante dal numero inferiore di videocamere utilizzate per le elaborazioni fotogrammetriche, valutazione che riguarda la parte finale della zona di deposito come evidenziato in figura.

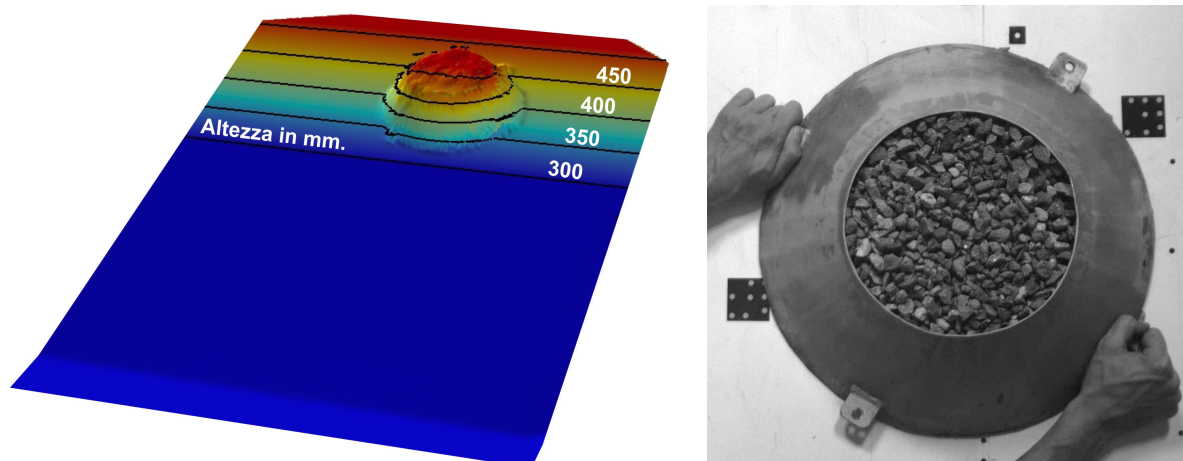


Figura 5.12: Configurazione di partenza per gli esperimenti 1 e 2 su pendio aperto. Il sollevamento della forma di contenimento del materiale avviene in modo manuale.

5.3.2 Evoluzione nel tempo

L'acquisizione simultanea avviene con frequenza pari a 15 frames al secondo. Il procesamiento delle immagini viene effettuato per gli istanti ritenuti più significativi per la rappresentazione del comportamento fisico del materiale. L'evoluzione della forma nello spazio e nel tempo evidenzia come il materiale granulare grossolano evolva da una forma a pera, ad una configurazione trilobata del deposito finale. Questa è dovuta ad un precoce arresto dei lobi laterali rispetto al lobo centrale. L'arresto del lobo centrale avviene infatti circa 0.5 s in ritardo. Nella sequenza inferiore di Figura 5.14 è evidente un avanzamento del corpo centrale che si protrae verso valle a dispetto dei corpi periferici già stabilizzati.

È possibile effettuare una generalizzazione del movimento dell'ammasso schematizzando nel modo seguente (Fig. 5.15 e 5.17):

1. Fase di scorrimento con espansione laterale del materiale;
2. Fase di rallentamento con avanzamento indifferenziato in superficie;
3. Fase di arresto delle 2 porzioni esterne;
4. Fase di avanzamento di un cuneo centrale.
5. Accumulo residuo in coda derivante da movimento di grani con interazioni e urti per lo più assenti.

La forma del deposito andatasi così a creare è costituita da 3 lobi, di cui quello centrale si va progressivamente distanziando a causa dell'arresto ritardato. Il cuneo di avanzamento lascia dietro di sé una depressione che separa lateralmente i 2 lobi esterni.

I diversi istanti analizzati fotogrammetricamente possono essere facilmente descritti e analizzati in termini volumetrici per valutare le variazioni di volume e quindi dei vuoti intergranulari. Il volume di partenza è stato misurato sperimentalmente ed è di 9.83 dm^3 . Seguendo l'andamento si desume che ad un modesto ma non trascurabile aumento di volume nei primi decimi, ne sussegue un costante e deciso calo fino ad un valore minimo inferiore agli 8 dm^3 , per poi assestarsi attorno ad un valore leggermente superiore nelle

t(s)	0.53	0.73	0.93	1.13	1.33	1.53	1.66	1.72	1.79	1.85	1.92	2.33
Numero immagini	6	6	7	8	8	8	7	7	6	6	6	4
Risoluzione a terra (mm/pix)	0.775	0.781	0.83	0.825	0.854	0.852	0.846	0.845	0.836	0.834	0.831	0.885
Area di copertura (m ²)	0.362	0.563	0.79	0.898	0.949	0.892	0.845	0.789	0.767	0.715	0.667	0.575
Tie points	4789	6910	7608	8224	8438	7920	5695	5076	6074	5727	5253	2529
Errore (pix)	0.657	0.653	0.64	0.7	0.67	0.578	0.528	0.449	0.557	0.517	0.466	0.364
Errore (mm)	0.509	0.510	0.529	0.578	0.572	0.492	0.447	0.379	0.466	0.431	0.387	0.322
Densità punti DEM (pt/mm ²)	22.4	12.6	7.28	5.74	4.57	4.1	4.26	4.03	4.87	5.61	4.83	10.54

Tabella 5.4: Informazioni principali che partecipano alla definizione del DTM dell'ammasso granulare negli istanti di tempo elaborati.

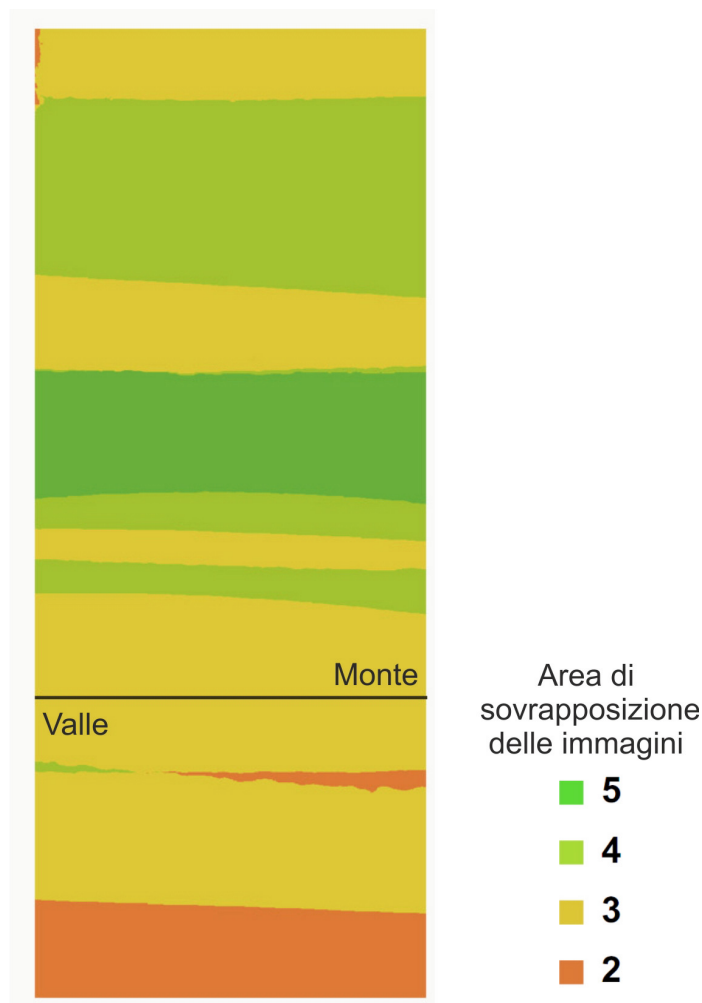


Figura 5.13: Area di sovrapposizione delle immagini plottata sui piani della canaletta sperimentale.

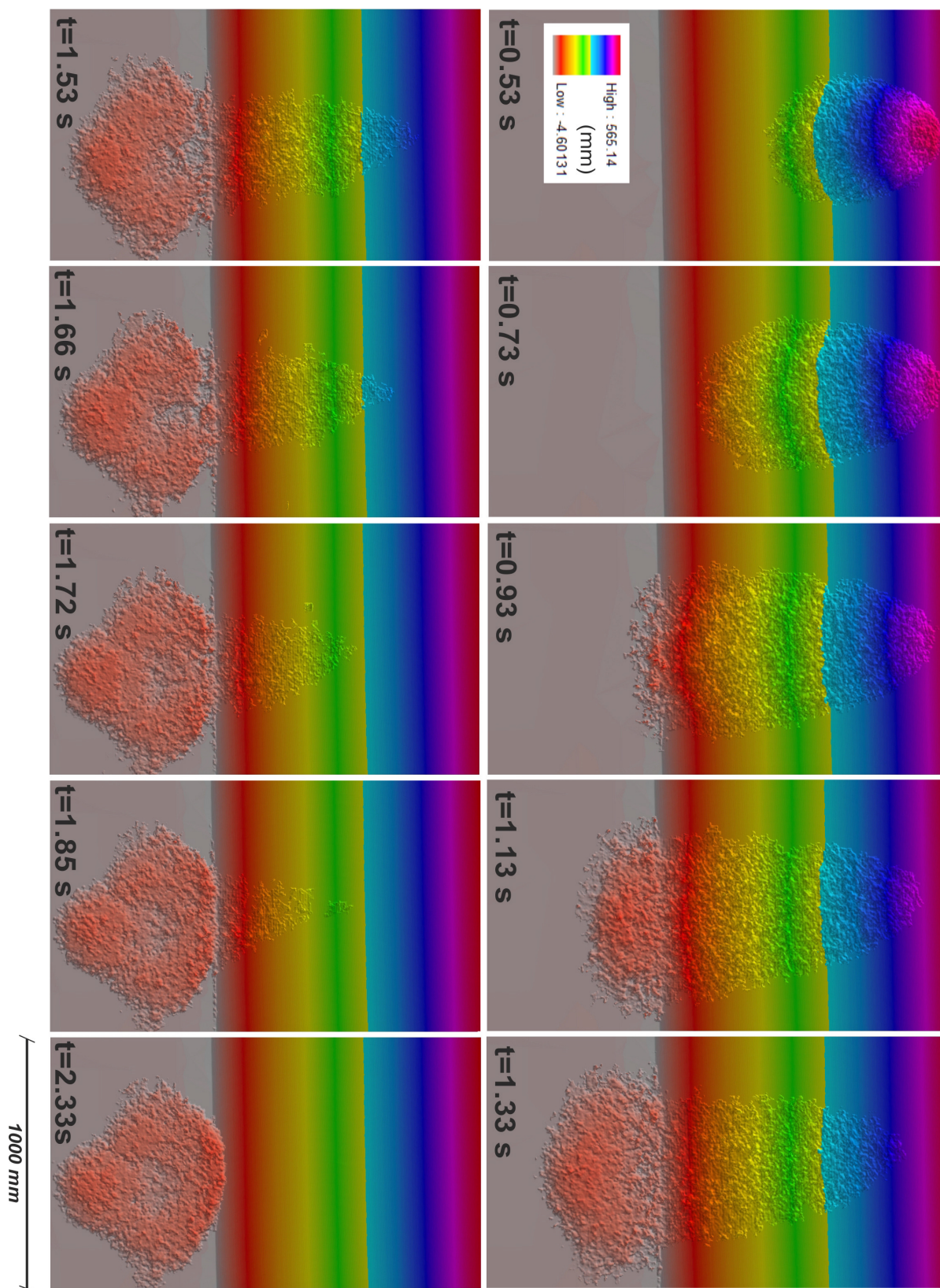


Figura 5.14: Evoluzione tridimensionale dei DTM negli istanti analizzati fotogrammetricamente.

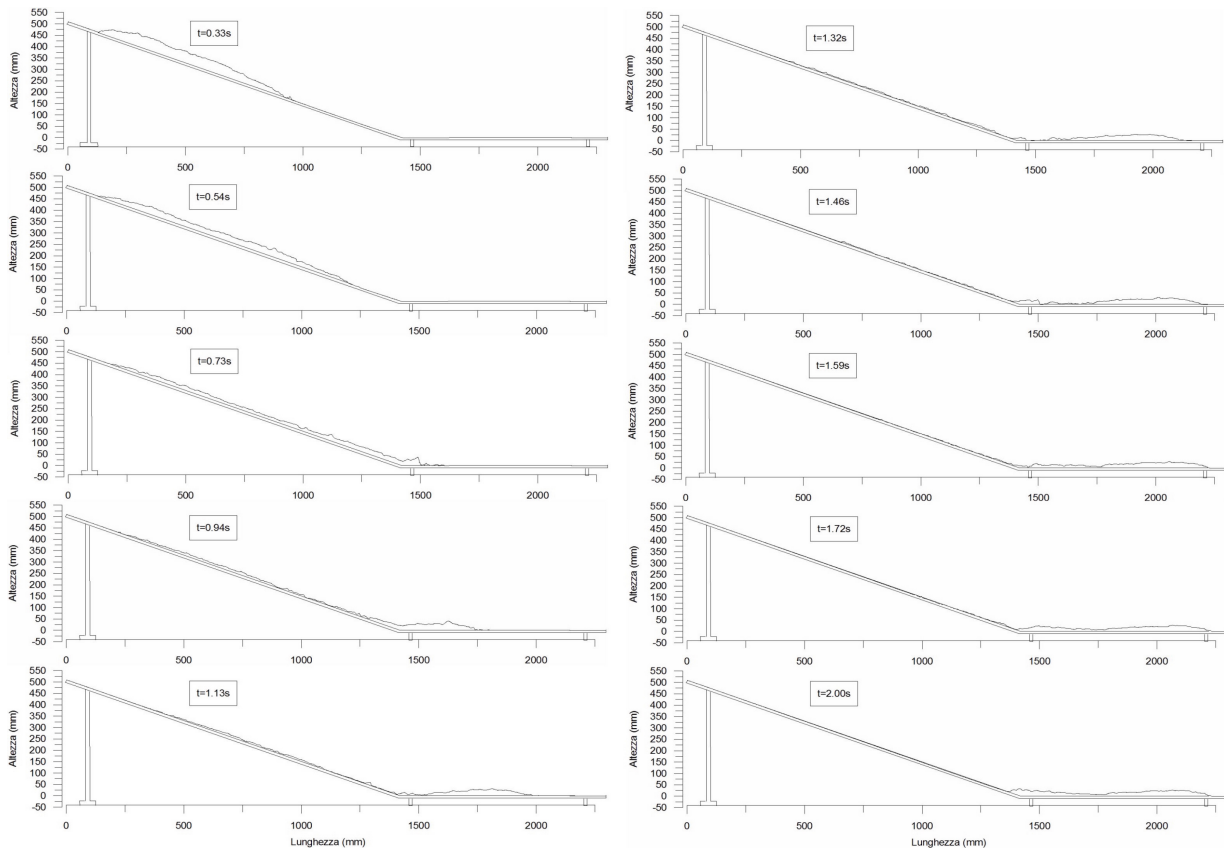


Figura 5.15: Sezioni longitudinali che mostrano l'evoluzione nel tempo del fronte e della coda dell'ammasso granulare.

fasi finali (Figura 5.16). L'analisi dell'errore sui dati, per questo grafico come per i successivi, è stato valutato sulla base degli *RMSE* riferiti ad ogni istante di tempo. È stata quindi formulata l'ipotesi che gli errori (reprojection error) applicati ai *GCP* possano essere omogeneamente distribuiti su tutta la superficie occupata dal materiale granulare e trasformati in termini volumetrici. Si deduce come gli *RMSE* applicati non possano alterare o modificare sensibilmente l'andamento volumetrico generale.

Il grafico viene suddiviso in 3 aree di pertinenza:

1. il materiale si trova sul piano di monte;
2. il materiale si trova distribuito sia sul piano di monte che di valle;
3. il materiale è in avanzamento sul piano di valle.

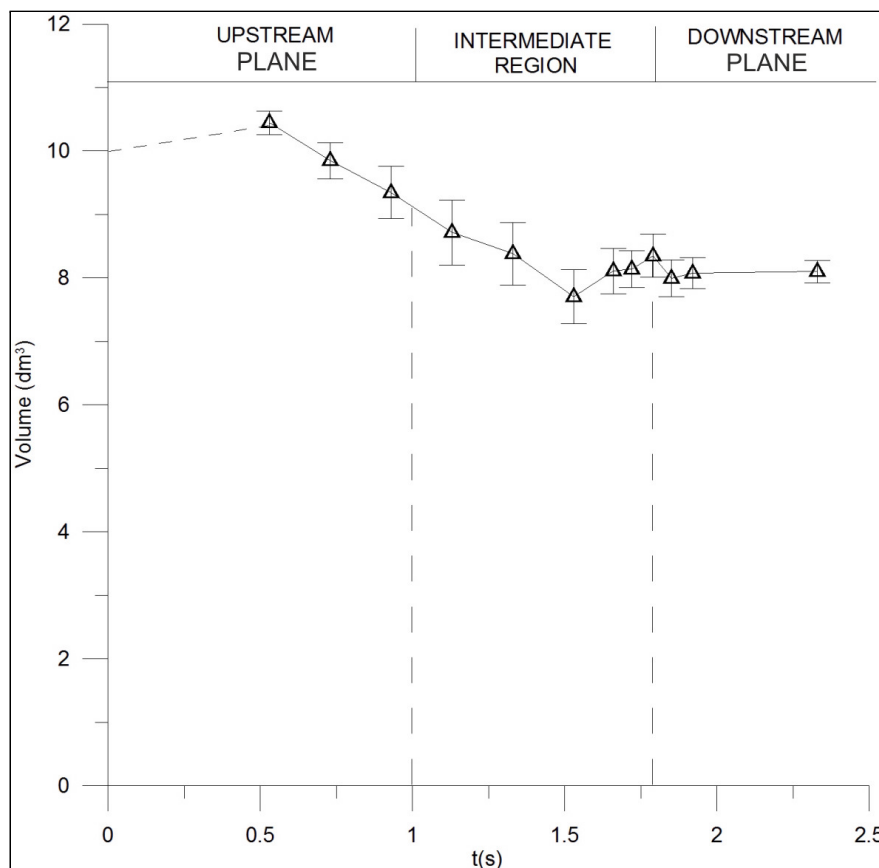


Figura 5.16: Volume occupato dall'ammasso nel tempo. Ad una iniziale piccola dilatazione segue una prolungata fase di contrazione del volume. Prima della stabilizzazione finale si registra un leggero recupero.

5.4 Flusso zeolitico in pendio aperto (Test 2)

La configurazione dell'apparato sperimentale non è stata modificata rispetto al *Test 1*, così come la metodologia adottata per l'esecuzione del test sperimentale (sez. 5.3). L'utilizzo del materiale zeolitico ha comportato un aggiustamento del posizionamento delle videocamere sulle strutture di supporto rispetto al test precedente, per consentire la copertura totale del materiale in scivolamento sui piani di base della canaletta, soprattutto trasversalmente rispetto alla direzione di scorrimento. La durata della prova è di 2.5 s circa. Sono state analizzate 9 istantanee, tenendo comunque presente che il volume, la forma e la posizione del materiale è conosciuta.

5.4.1 Analisi fotogrammetrica dei frames

Nella Tabella 5.5 si evidenziano alcuni dati caratteristici delle elaborazioni fotogrammetriche relative ai diversi frames considerati. Il tempo $t = 0$ ha come riferimento l'inizio della movimentazione del materiale, ed il contenitore conico viene sollevato verso l'alto. La risoluzione è inferiore ad $1 \text{ mm}/\text{pix.}$, l'area di copertura indica la superficie planare occupata dal materiale, i tie points indicano il numero di punti individuati esclusivamente sulla superficie del materiale. La densità di punti per la costruzione del modello digitale del terreno, è funzione della distanza delle videocamere dalla superficie della canaletta speri-

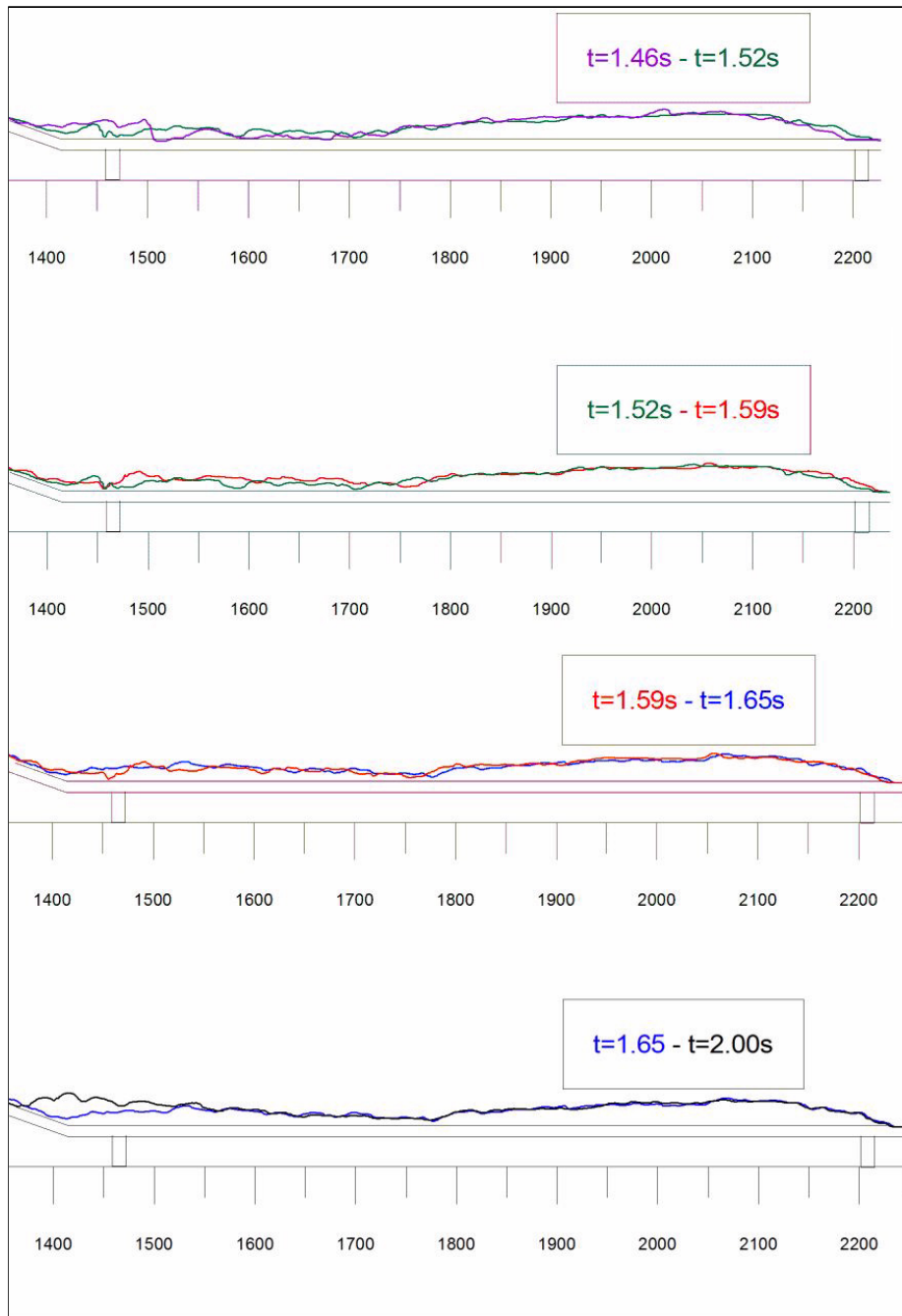


Figura 5.17: Sezione longitudinale riferita alla Figura 5.15, del piano a valle di rallentamento e deposito. L'evoluzione della forma nello spazio e nel tempo evidenzia come il materiale granulare grossolano evolva da una forma a pera (Figura 5.14), ad una configurazione trilobata del deposito finale. Questo è dovuto ad un precoce arresto dei lobi laterali rispetto al lobo centrale. L'arresto del lobo centrale avviene circa 0.5 s in ritardo. Nella sequenza si può notare un avanzamento del corpo centrale che si protrae verso valle, a dispetto dei corpi periferici già stabilizzati. Negli istanti finali il deposito risulta ormai stabile, mentre il materiale residuo in coda forma un piccolo accumulo secondario.

mentale nonchè della lunghezza focale delle videocamere che partecipano alla definizione tridimensionale del relativo frame. L'errore, che in fotogrammetria viene valutato come *RMSE*, è inferiore a 1 *mm* per quasi tutti gli istanti di tempo processati.

La copertura delle videocamere sull'apparato sperimentale è evidenziata in Figura 5.18. I colori stanno ad indicare il numero di videocamere i cui raggi si vanno ad intersecare, e questo dipende dal *FOV* di ognuna di esse e dalla distanza dalla superficie della canaletta sperimentale. Sulla base del numero di videocamere disponibili si è optato per una maggiore definizione nella zona di scorrimento, dove il software ha mostrato segni di instabilità maggiori, soprattutto per quanto riguarda la ricostruzione della geometria, successiva al riconoscimento dei punti sulla superficie granulare. La presenza di 2 videocamere soltanto, necessita di una riduzione di errore nella collocazione manuale dei *GCP*, di un maggior numero di punti ben distribuiti attorno al deposito. Rispetto al test precedente, la configurazione delle videocamere è stata modificata a causa della diversa evoluzione del materiale zeolitico sulla superficie dei piani: La minore propagazione longitudinale ha infatti consentito di sovrapporre maggiormente i campi di vista verso monte, d'altro canto però la maggiore espansione verso l'esterno ha imposto la predisposizione delle videocamere sulla base della valutazione del maggiore *FOV* delle videocamere ad inferiore lunghezza focale.

t(s)	0.46	0.67	0.86	1.07	1.26	1.46	1.65	1.87	2.04	2.63
Numero immagini	4	8	8	8	8	8	8	8	4	4
Risoluzione a terra (mm/pix)	0.81	0.85	0.85	0.85	0.85	0.88	0.87	0.87	0.86	0.92
Area materiale (dm ²)	0.53	0.9	1.22	1.42	1.43	1.32	1.17	0.99	0.83	0.61
Tie points	2397	4309	4716	5383	5254	5102	4518	4308	3836	2714
Errore (pix)	0.958	0.69	0.77	0.63	0.58	0.67	0.64	0.58	0.45	1.14
Errore (mm)	0.76	0.586	0.65	0.53	0.49	0.59	0.56	0.5	0.39	1.05
Densità punti DEM (pt/mm ²)	18.64	10.71	7.81	6.28	5.96	6.3	7.06	7.76	6.87	6.54

Tabella 5.5: Informazioni principali che definiscono o che partecipano alla definizione del DTM dell'ammasso granulare negli istanti di tempo elaborati.

5.4.2 L'evoluzione nel tempo

In particolare, il comportamento delle zeoliti differisce in maniera evidente dal comportamento del materiale grossolano in espansione libera. Il materiale zeolitico tende a divergere molto velocemente verso le direzioni esterne negli istanti successivi al rilascio. L'arresto avviene più a monte ed in maniera graduale da valle verso monte. Il deposito è descritto da una forma allungata perpendicolarmente alla direzione di scorrimento, come evidenziato dalle isoipse di Figura 5.20 e non si notano movimenti differenziali negli istanti finali come invece accade per il materiale granulare grezzo. I punti a quota più elevata tendono a retrocedere nel tempo rispetto alla direzione di scorrimento; l'accumulo tende infatti a concentrarsi immediatamente a valle del cambio di pendenza. L'altezza massima del deposito è compresa tra i 25 *mm* e i 30 *mm*.

Il volume complessivo del semicono all'interno del quale viene sistemato il materiale ha una capienza totale di poco meno di 10 *dm*³. Tuttavia l'angolo d'attrito relativamente

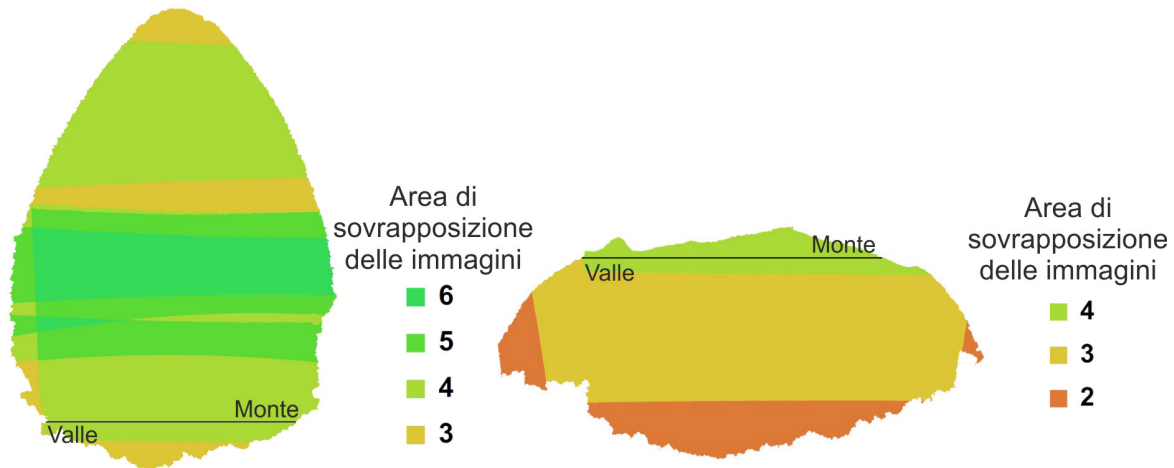


Figura 5.18: Area di sovrapposizione delle immagini plottata sui piani della canaletta sperimentale.

basso del materiale, considerata inoltre l'inclinazione di partenza di 27.5° , consente un riempimento parziale dell'ordine di $8.50 - 9 \text{ dm}^3$. La variazione di volume nel tempo viene descritta dal grafico di Figura 5.21 nel quale si evidenzia come il moto del materiale sia sottoposto a fenomeni di espansione-compressione nel tempo e nello spazio.

Durante la fase nella quale il materiale occupa il piano di monte, l'espansione laterale che esso subisce è associata ad un progressivo aumento di volume. Il brusco calo di pendenza passando dal piano di monte al piano di valle genera un repentino calo dei vuoti tra le particelle e conseguentemente anche di volume. Si raggiunge un minimo di circa 6 dm^3 . Il rilassamento finale stabilizza il volume attorno ad un valore comparabile al valore di partenza. L'area occupata dal materiale sulla base dell'apparato sperimentale ha evidentemente il suo massimo negli istanti precedenti al rallentamento sul cambio di pendenza. La distribuzione areale massima coincide con valori massimi di volume del materiale.

Le sezioni longitudinali consentono di effettuare una stima precisa delle velocità e dell'accelerazione subita dal materiale durante la discesa, sia del fronte che della coda. Le velocità, oltre ad essere inferiori, sono molto più lineari per quanto riguarda la coda, senza picco di velocità che nel caso del fronte è invece dell'ordine di 2 m/s (Figura 5.22).

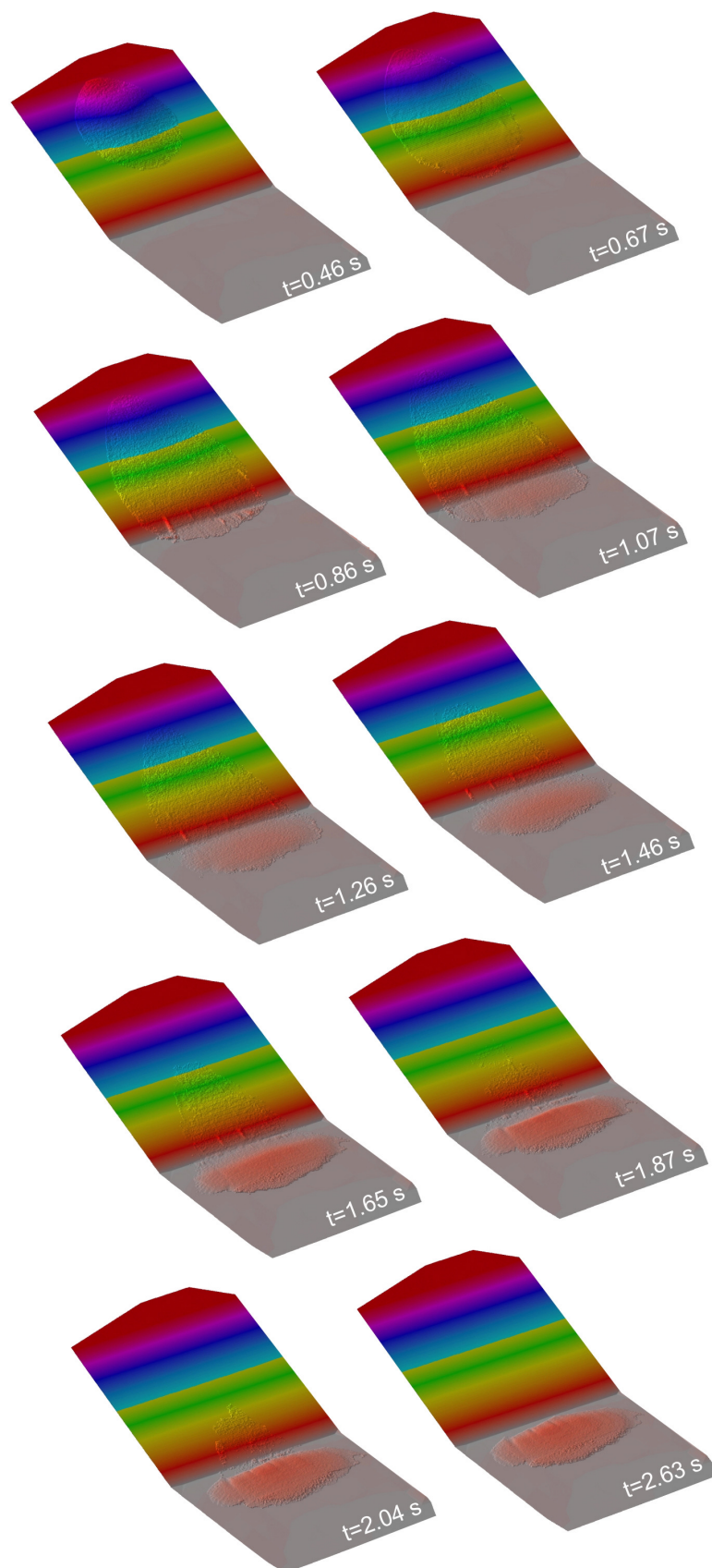


Figura 5.19: Evoluzione tridimensionale dei DTM negli istanti analizzati fotogrammetricamente.

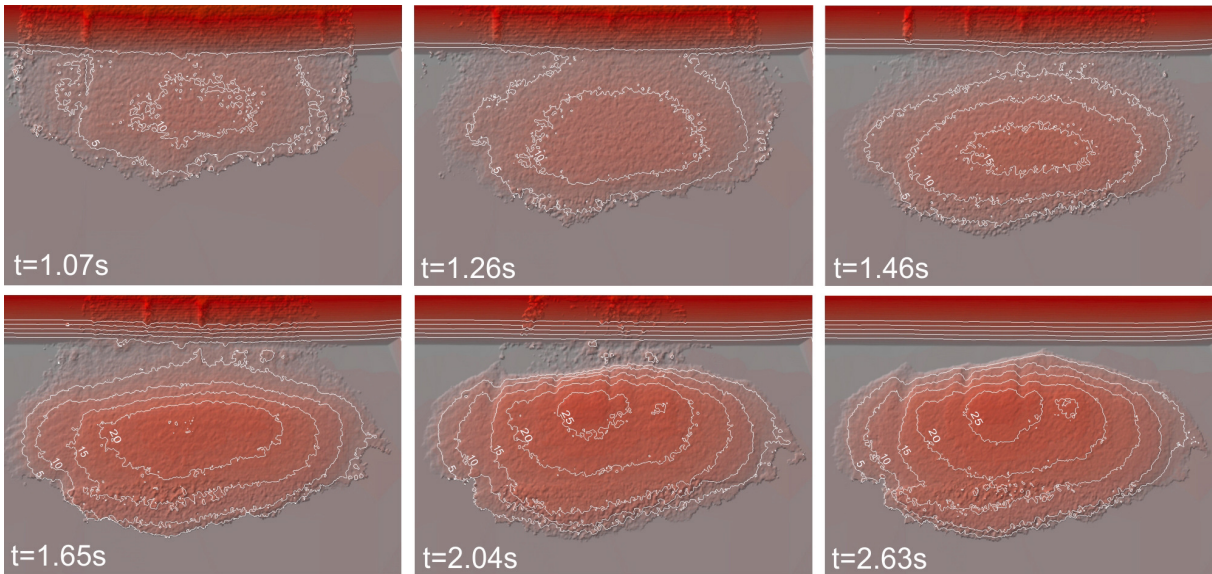


Figura 5.20: Particolare della fase deposizionale riferita al Test 2. L'equidistanda tra le isoipse è di 5 *mm*.

5.5 Effetto del flusso della ghiaia su un deviatore (Test 3)

La configurazione dell'apparato sperimentale è rimasta inalterata rispetto alle prove in pendio aperto. Tuttavia il materiale risulta incanalato nella parte di scorrimento di monte grazie all'utilizzo di 2 barre alte 15 *cm* per uno spessore di 1 *cm* distanziate di 20 *cm* l'una dall'altra. La messa in posto di un deviatore di flusso allo sbocco sul piano di valle genera un rallentamento e una modifica della direzione di flusso. Il deviatore presenta inclinazione sull'orizzontale di 45° ed un'altezza di 15 *cm*. L'angolo d'impatto è di 25° rispetto alla direzione dell'asse *y*. Il rilascio del materiale avviene attraverso il sollevamento di una paratia posta nella parte apicale del piano di monte.

5.5.1 Analisi fotogrammetrica dei frames

Nella Tabella 5.6 si evidenziano alcuni dati caratteristici delle elaborazioni fotogrammetriche relative ai diversi frames considerati. Il tempo $t = 0$ ha come riferimento l'inizio della movimentazione del materiale, allorquando il setto di contenimento viene manualmente sollevato. La risoluzione è poco inferiore ad 1 *mm/pix.*, l'area di copertura indica la superficie planare occupata dal materiale, i tie points indicano il numero di punti individuati esclusivamente sulla superficie del materiale. La densità di punti per la costruzione del modello digitale del terreno, è funzione della distanza delle videocamere dalla superficie della canaletta sperimentale nonché della lunghezza focale delle videocamere che partecipano alla definizione tridimensionale del relativo frame.

La copertura delle videocamere sull'apparato sperimentale è evidenziata in Figura 5.23. I colori stanno ad indicare il numero di videocamere i cui raggi si vanno ad intersecare, e questo dipende dal *FOV* di ognuna di esse e dalla distanza dalla superficie della canaletta sperimentale. Sulla base del numero di videocamere disponibili si è optato per una maggiore definizione nella zona di scorrimento, dove il software ha mostrato segni

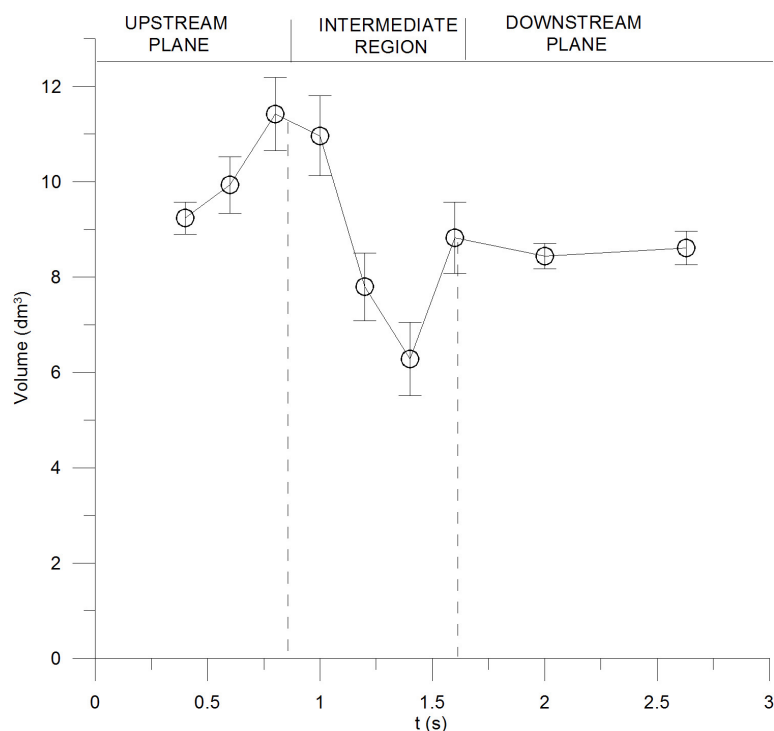


Figura 5.21: Volume occupato dall'ammasso nel tempo. Ad una fase iniziale di dilatazione segue una fase di contrazione del volume. Prima della stabilizzazione finale si registra un recupero.

di instabilità maggiori, soprattutto per quanto riguarda la ricostruzione della geometria, successiva al riconoscimento dei punti sulla superficie granulare. La presenza di 2 videocamere soltanto, necessita di una riduzione di errore nella collocazione manuale dei *GCP* e di un maggior numero di punti ben distribuiti attorno al deposito. Si limita così il deficit derivante dal numero inferiore di videocamere utilizzate per le elaborazioni fotogrammetriche, valutazione che riguarda la parte finale della zona di deposito come evidenziato in figura.

t (s)	0.27	0.47	0.67	0.87	1.07	1.27	1.47	1.67	1.87	2.07	2.27	2.6	2.94	3.27	4.34
Numero immagini	4	4	5	6	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	5
Risoluzione a terra (mm/px)	0.76	0.76	0.786	0.77	0.82	0.82	0.82	0.83	0.826	0.827	0.827	0.826	0.83	0.83	0.832
Area materiale (dm²)	9.8	14	19.5	27	34.6	39.8	40.75	41.83	42.76	43.96	45.25	45.6	44.7	42.2	24.3
Tie points	1133	1896	2471	3412	3739	4054	4454	4943	4905	4994	4262	5184	4775	3889	2339
Errore (pix)	0.232	0.159	0.239	0.235	0.216	0.269	0.438	0.382	0.313	0.249	0.201	0.227	0.308	0.223	0.192
Errore (mm)	0.671	0.96	0.5	0.803	0.698	0.715	0.755	0.684	0.641	0.692	0.851	0.785	0.78	0.78	0.553
Densità punti DEM (pt/mm²)	57.5	29.1	13.5	8.46	5.3	3.8	3.42	3.29	3.23	3.28	3.245	3.46	3.68	4.32	9.58

Tabella 5.6: Informazioni principali che definiscono o che partecipano alla definizione del DTM dell'ammasso granulare negli istanti di tempo elaborati.

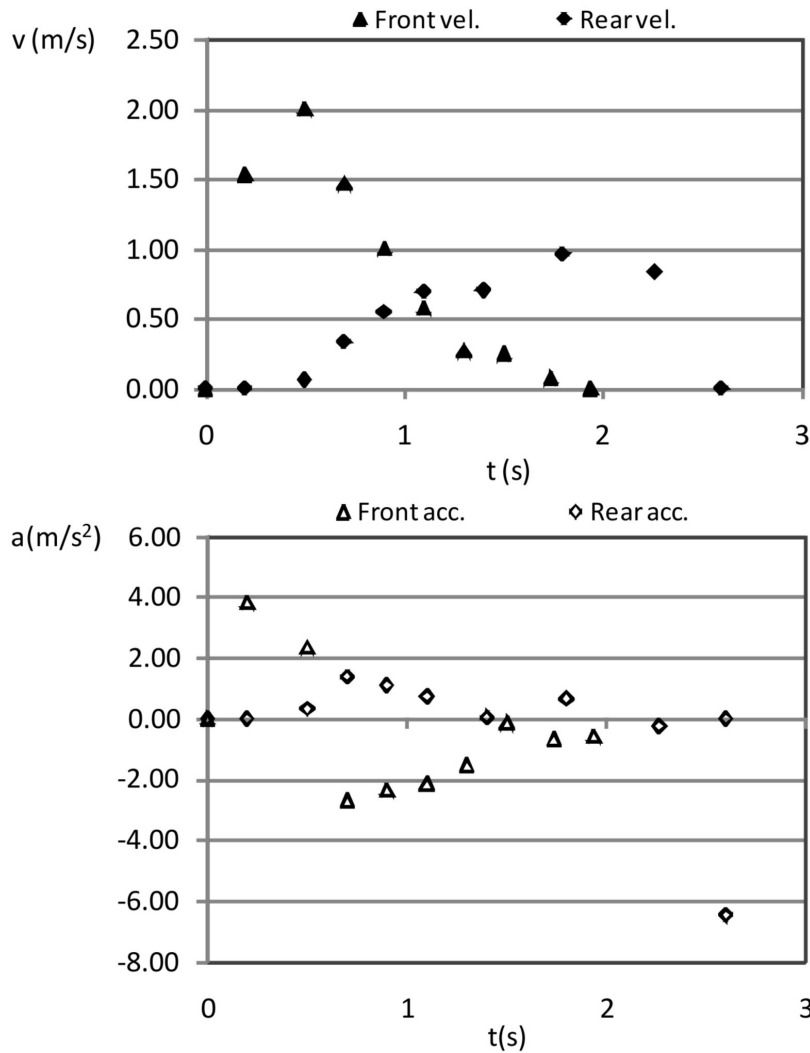


Figura 5.22: I grafici mostrano il valore puntuale delle velocità preso come riferimento centrale dell'intervallo nell quale è stata calcolata. Lo stesso è stato fatto per le accelerazioni.

5.5.2 L'evoluzione nel tempo

L'effetto attritivo intergranulare e sul fondo del materiale influenza fortemente le caratteristiche reologiche e deposizionali. (Figura 5.24). L'arresto del fronte avviene in modo rapido, circa 0.50 s dopo il raggiungimento del piano ad inclinazione inferiore. L'effetto di resistenza prodotto dal materiale provoca il blocco di gran parte del volume retrostante che si accumula in corrispondenza del cambio di pendenza risalendo sino alla sezione di uscita dove termina il regime di flusso incanalato operato dal contenimento laterale delle sponde. Tali evidenze sono descritte in Figura 5.25, dove è stata analizzata l'evoluzione nel tempo dell'area occupata dall'ammasso in 3 sezioni trasversali. L'arresto del materiale a valle in corrispondenza della sezione L causa il deposito a monte nella zona della sezione I . Le sezioni sono state poste in posizioni rappresentative del comportamento del materiale.

La variazione volumetrica del materiale nel tempo evidenzia una generale tendenza alla contrazione che segue ad una fase breve iniziale di dilatazione. (Figura 5.26). Il



Figura 5.23: Sovrapposizione delle immagini sulla canaletta sperimentale. La configurazione rimane inalterata rispetto al Test 1.

comportamento del materiale tende a seguire quello assunto in condizioni di pendio aperto, seppur in proporzione e scala diverse. La contrazione totale tra il tempo $t = 0$ e la condizione di arresto finale è di 1 dm^3 circa, mentre in condizioni di pendio aperto la contrazione complessiva è di 2 dm^3 , tenendo seppur presente il diverso volume di partenza nei 2 test sperimentali.

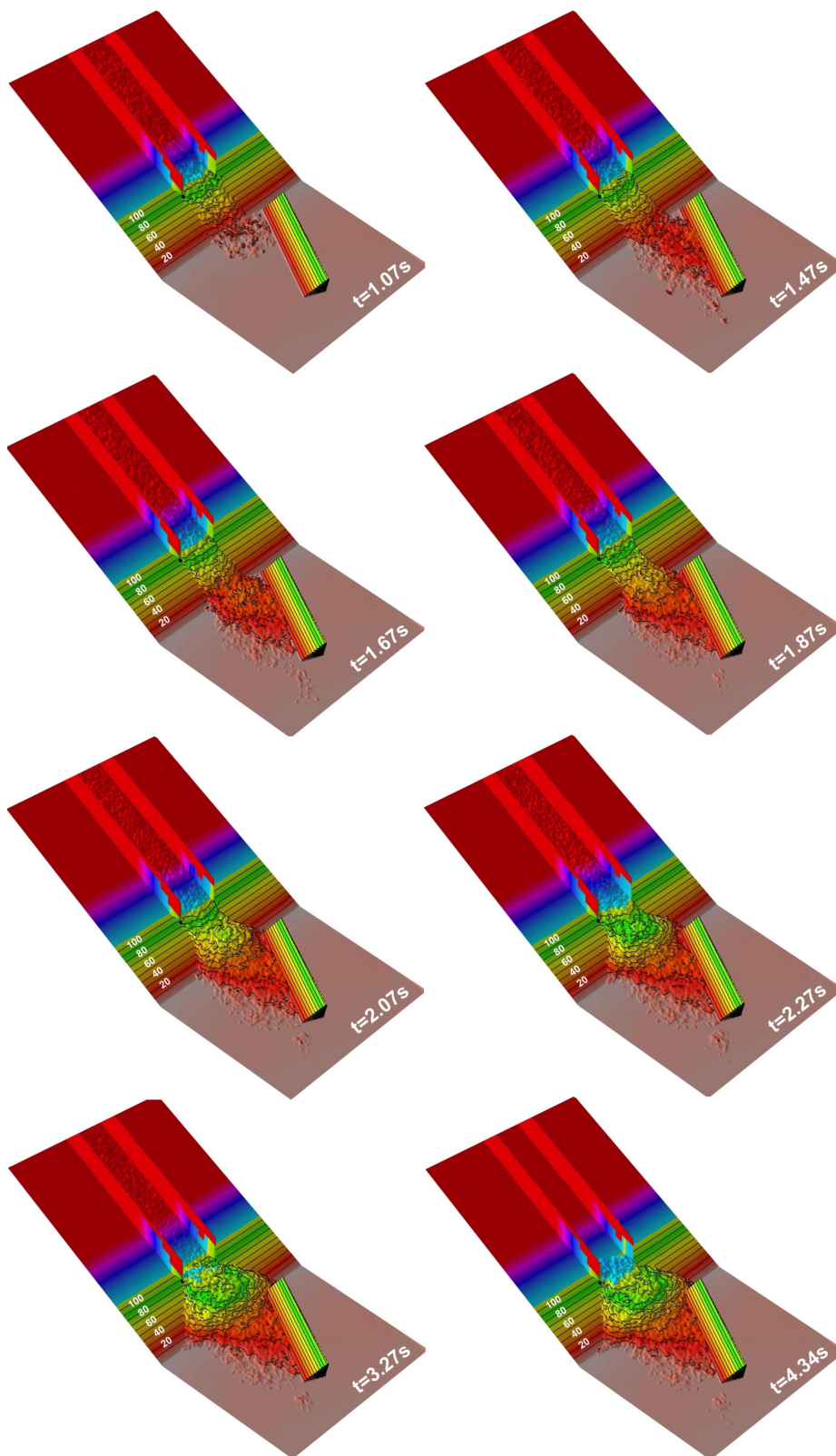


Figura 5.24: Evoluzione tridimensionale dei *DTM* nella fase centrale e finale del moto.

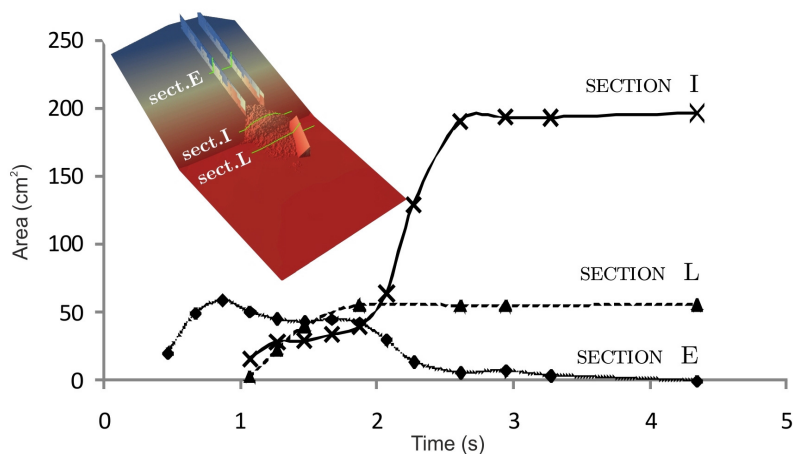


Figura 5.25: Il grafico visualizza la variazione dell'area sottesa alle 3 sezioni di interesse. Si possono trarre così delle informazioni sul comportamento del materiale e sulle tempistiche deposizionali.

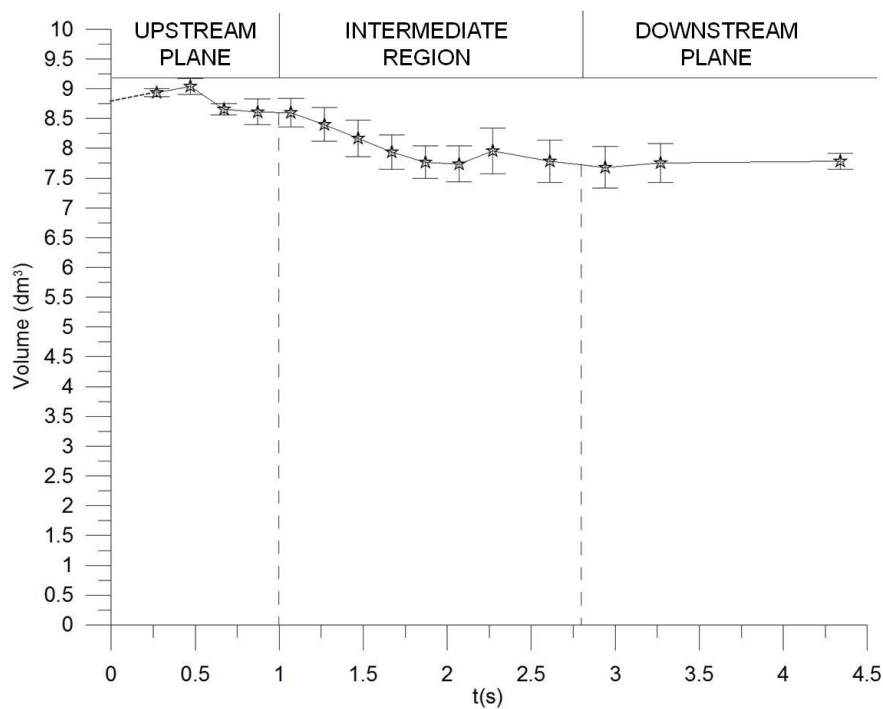


Figura 5.26: Volume occupato dall'ammasso nel tempo. Ad una iniziale piccola dilatazione segue una prolungata fase di contrazione del volume. Prima della stabilizzazione finale si registra un leggero recupero.

5.6 Effetto del flusso zeolitico su un deviatore (Test 4)

La configurazione dell'apparato sperimentale è rimasta inalterata rispetto al *Test 3*. Il materiale risulta incanalato nella parte di scorrimento di monte grazie all'utilizzo di 2 barre alte 15 cm per uno spessore di 1 cm distanziate di 20 cm l'una dall'altra. La messa in posto di un deviatore di flusso allo sbocco sul piano di valle genera un rallentamento e una modifica della direzione di flusso. Il deviatore presenta inclinazione sull'orizzontale di 45° ed un'altezza di 15 cm. L'angolo d'impatto è di 25° rispetto alla direzione dell'asse y . Il rilascio del materiale avviene attraverso il sollevamento di una paratia posta nella parte apicale del piano di monte.

5.6.1 Analisi fotogrammetrica dei frames

La prova sperimentale è stata studiata attraverso l'analisi fotogrammetrica di 15 frames. Le videocamere sono state settate ad una velocità di acquisizione di 15 *fps*. Lo studio fotogrammetrico ha coinvolto la restituzione in media di 5 frame al secondo. La durata complessiva della prova è di 3.4 s circa. Nella Tabella 5.7 si evidenziano alcuni dati caratteristici delle elaborazioni fotogrammetriche relative ai diversi frames considerati. Il tempo $t = 0$ ha come riferimento l'inizio della movimentazione del materiale, allorché il setto di contenimento viene manualmente sollevato. La risoluzione è poco inferiore ad 1 *mm/pix*. Il numero di tie points automaticamente individuati sulla superficie del materiale per la ricostruzione tridimensionale è inferiore al *Test 3*. Tuttavia l'inserimento del tracciante bianco in *PVC* all'interno del materiale zeolitico garantisce una distribuzione densa ed omogenea di punti più che sufficiente ai nostri scopi.

La configurazione delle videocamere sulla struttura di supporto è inalterata rispetto al *Test 1* e *3*.

t(s)	0.2	0.33	0.53	0.73	0.93	1.13	1.33	1.53	1.73	1.93	2.13	2.33	2.53	2.73	4
Numero immagini	4	4	6	7	8	8	8	8	8	8	7	7	7	7	4
Risoluzione a terra (mm/pix)	0.77	0.77	0.78	0.83	0.82	0.82	0.82	0.82	0.83	0.86	0.85	0.83	0.83	0.82	0.88
Area materiale (dm ²)	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Tie points	941	1494	2083	2377	2696	3013	3414	3891	4037	3619	3511	3154	3106	2923	2165
Errore (pix)	0.71	0.75	0.7	0.63	0.54	0.72	0.51	0.53	0.53	0.52	0.49	0.47	0.64	0.51	0.55
Errore (mm)	0.55	0.58	0.55	0.52	0.44	0.59	0.42	0.43	0.44	0.45	0.42	0.39	0.53	0.42	0.48

Tabella 5.7: Informazioni principali che definiscono o che partecipano alla definizione del DTM dell'ammasso granulare negli istanti di tempo elaborati.

5.6.2 L'evoluzione nel tempo

Le diverse proprietà attrittive di questo materiale impongono un comportamento diverso sia nella modalità di propagazione del flusso che nelle fasi di arresto rispetto al *Test 3*. Dalle elaborazioni fotogrammetriche si osserva la generazione di un fronte d'onda derivante dall'impatto con il deviatore e con celerità di propagazione trasversale dell'ordine di 0.1 –

0.2 m/s, di un ordine di grandezza inferiore rispetto alla velocità massima raggiunta dal fronte. Il comportamento è dunque confrontabile a quello di un fluido in questo caso. L'arresto del fronte avviene in modo rapido, circa 0.50 s dopo il raggiungimento del piano ad inclinazione inferiore. L'accumulo del materiale avviene quasi interamente a valle, solo la parte finale della coda si arresta sul cambio di pendenza. Esso risulta distribuito omogeneamente con basso gradiente della superficie libera. Rispetto al test precedente l'angolo d'attrito sul fondo del materiale risulta inferiore ed il moto si arresta quindi più a valle (Figura 5.28).

Il materiale zeolitico non presenta particolari variazioni volumetriche tra l'istante iniziale e finale, come già apprezzato nel *Test 2* (Figura 5.27). La tendenza osservata non è dissimile dalle prove precedenti con un rilassamento nella fase iniziale seguito da graduale contrazione volumetrica fino alla stabilizzazione negli istanti finali quando il materiale, raggiunto il piano di valle, decresce la propria velocità. In tutte le prove, indipendentemente dal materiale utilizzato, prima della stabilizzazione volumetrica si assiste ad una più o meno accentuata ripresa. La dilatazione volumetrica si verifica nelle istanti di tempo immediatamente successivi al raggiungimento del piano a pendenza inferiore da parte del materiale.

Si osserva come per i moto incanalati le fluttuazioni volumetriche siano più contenute rispetto ai moti su pendio aperto.

Ogni istante può essere analizzato metricamente nello spazio tridimensionale (Figura 5.29 e 5.30). Vengono qui riportate alcune sezioni significative tracciate sul piano di valle, dalle quali si possono trarre informazioni reologico-attritive utili alla fine della taratura di modelli matematico-numeric.

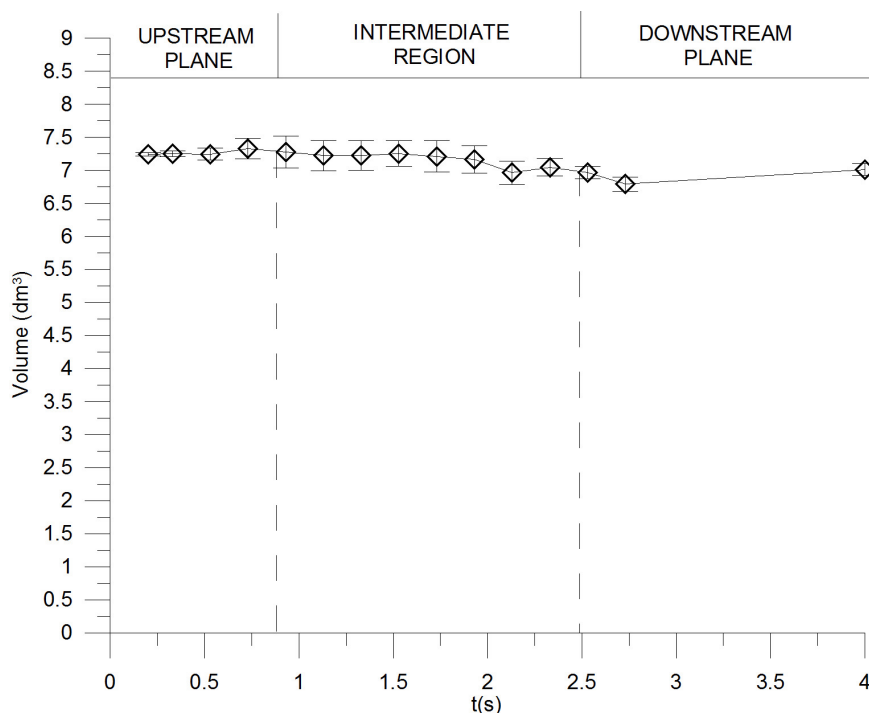


Figura 5.27: Volume occupato dall'ammasso nel tempo. Rispetto ai casi precedenti le variazioni risultano di entità inferiore anche se vi è una lieve tendenza alla contrazione nella fase centrale del moto. Non si riscontrano apprezzabili variazioni tra il volume iniziale e finale.

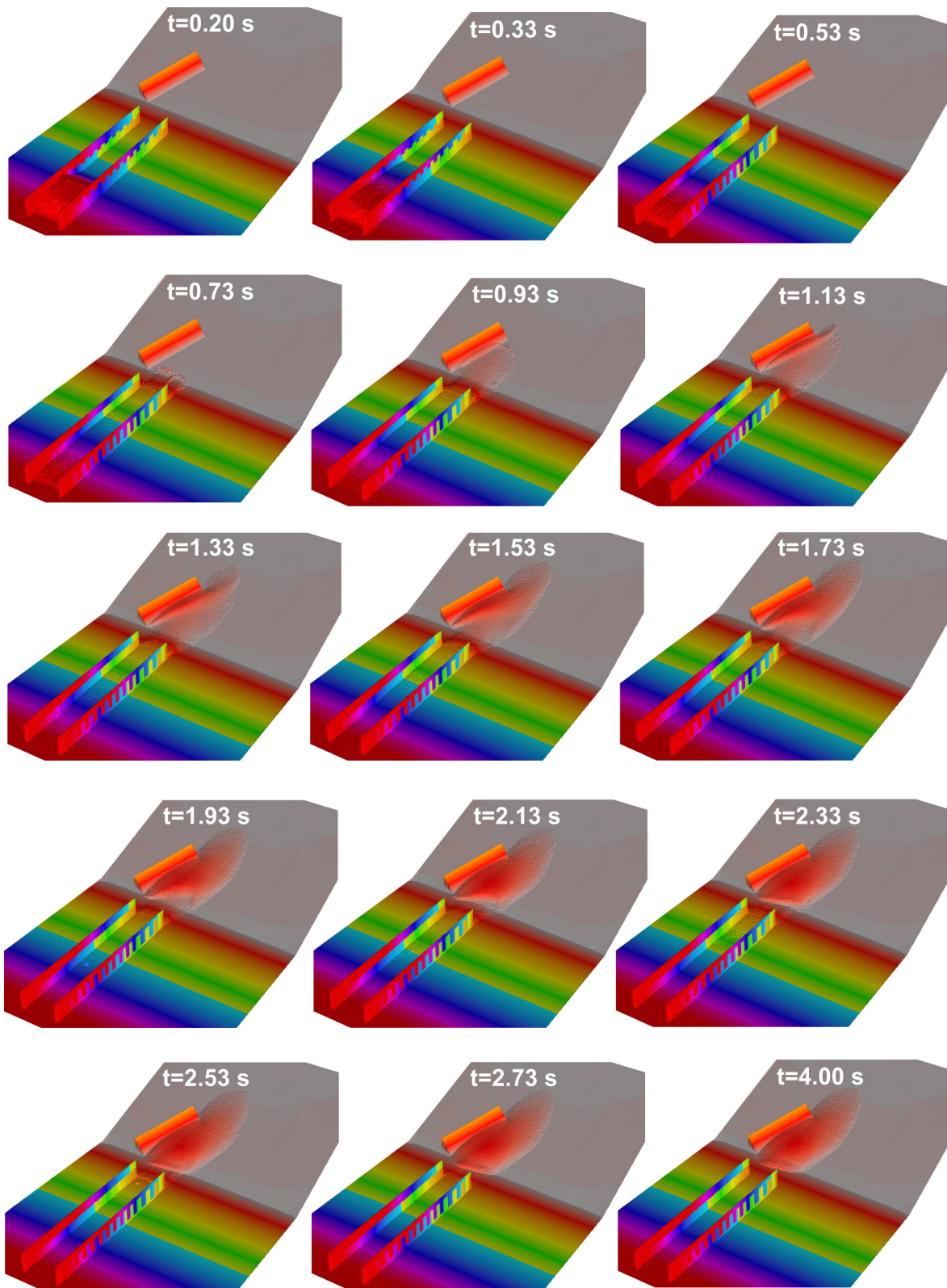


Figura 5.28: Evoluzione tridimensionale dei DTM negli istanti analizzati fotogrammetricamente.

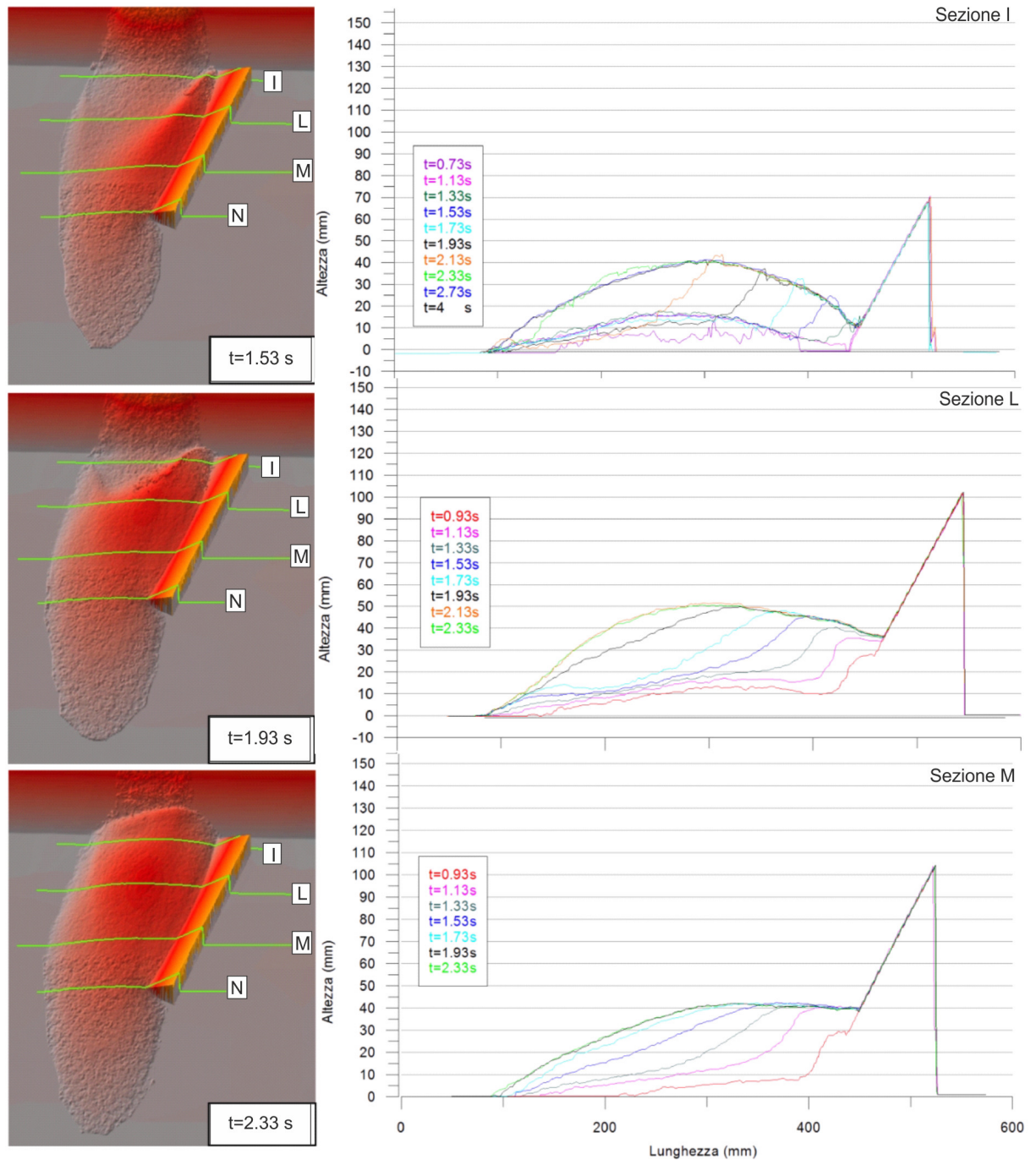


Figura 5.29: La figura presenta 3 sezioni sul piano di valle, tracciate trasversalmente rispetto alla direzione del moto, che mostrano l'evoluzione bidimensionale del materiale zeolitico granulare.

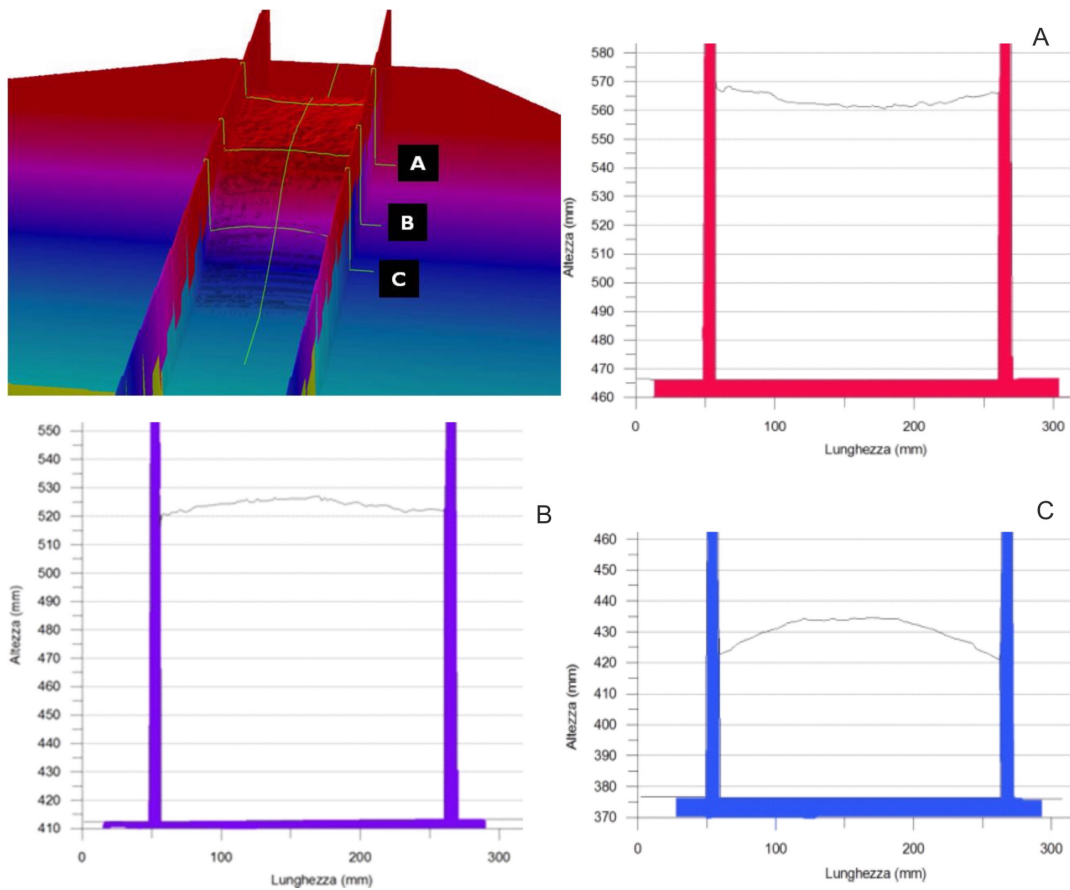


Figura 5.30: Modello digitale del terreno relativo ad un istante iniziale. Le sezione tracciata nella parte frontale del flusso granulare evidenzia un gradiente della superficie libera decrescente avvicinandosi alle pareti laterali. L'attrito di parete gioca verodimilmente un ruolo importante in tal senso.

5.7 Conclusioni

L'analisi dell'errore associato ai valori di altezza ricavati fotogrammetricamente è stato confrontato puntualmente in corrispondenza di 2 sezioni rappresentative, sia con il materiale granulare zeolitico che grossolano. Per il confronto diretto sono state posizionate 2 videocamere trasversalmente alla direzione di scorrimento. In funzione delle videocamere utilizzate per la restituzione fotogrammetrica gli errori possono variare da circa 0 *mm* a più di 1 *mm*. Una valutazione qualitativa dell'andamento trasversale, ed un confronto tra i diversi profili, possono risultare più rappresentativi del confronto puntuale. Il maggior numero di punti riconosciuti sul materiale granulare grossolano garantisce una miglior correlazione tra i profili. La disomogeneità superficiale che si crea con la ghiaia impone necessariamente un'approssimazione nella restituzione fotogrammetrica dovuta allo smoothing nella creazione delle mesh. A parità di punti riconosciuti sulla superficie del materiale, l'omogeneità superficiale del materiale zeolitico consente un'accuratezza migliore nella rappresentazione tridimensionale.

Il sistema sperimentale consente di rappresentare tridimensionalmente il moto di un ammasso granulare. La sovrapposizione pressochè perfetta che si evidenzia tra i vari profili nel tempo, consente di apprezzare differenze impercettibili sulle modalità di deposizione e dimostra l'affidabilità della metodologia applicata. Le prove di laboratorio assumono notevole importanza per la taratura dei modelli matematico-numeriche i quali hanno l'obiettivo di avvicinarsi il più possibile al fenomeno analizzato, in base ai parametri fisici utilizzati ed al modello reologico impiegato.

Le informazioni volumetriche sui test sperimentali permettono di osservare anche il comportamento dilatante o contraente del materiale al netto dell'accuratezza delle elaborazioni fotogrammetriche. Ulteriori validazioni a questo proposito sono ancora necessarie; tuttavia sono riscontrabili interessanti analogie per quanto riguarda l'andamento generale nel tempo per i tutti 4 i test.

Capitolo 6

Accuratezza dei test fotogrammetrici

L'accuratezza delle elaborazioni fotogrammetriche viene valutata mediante il parametro Residuo Globale ($RMSE$, root mean square error). Questo è definito dalla eq. 6.1 (Figura 6.1) dove Vx_i , Vy_i e Vz_i sono le differenze, nelle tre componenti x , y e z , tra i valori inseriti manualmente dei Control Points e i valori attribuiti dal software fotogrammetrico a seguito delle elaborazioni.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Vx_i^2 + Vy_i^2 + Vz_i^2)} \quad (6.1)$$

Il residuo per il singolo Control Point vale $\sqrt{Vx_i^2 + Vy_i^2 + Vz_i^2}$ e rappresenta la distanza tra la posizione inserita e la posizione calcolata.

In quanto segue viene presentata la analisi eseguita per il test sperimentale realizzato con materiale granulare grossolano in presenza di un deviatore planimetrico (*Test 3*). I risultati ottenuti possono ritenersi rappresentativi anche delle altre sperimentazioni eseguite.

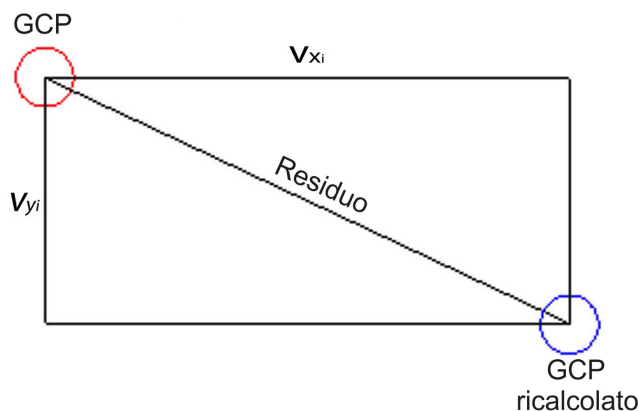


Figura 6.1: Differenza (residuo) tra la posizione del GCP (Ground Control Point) fornito dall'utente al software fotogrammetrico e la posizione dello stesso punto calcolata dal software.

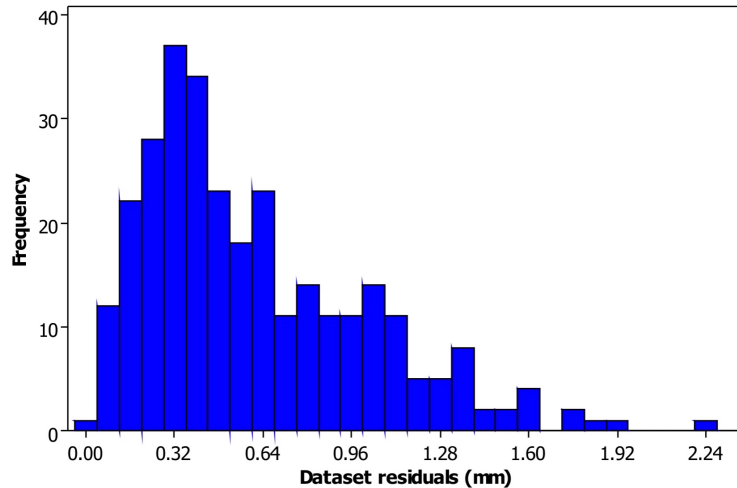


Figura 6.2: La frequenza relativa della variabile Residuo. Il campione di dati è stato costruito considerando tutti i Control Point nelle quindici elaborazioni eseguite. La numerosità del campione è risultata pari a 301.

6.1 L'errore residuo globale (RMSE)

In Figura 6.2 è rappresentata la frequenza relativa della variabile Residuo. Il campione di dati è stato ottenuto considerando tutti i GCP (vedi capitolo 2), nei quindici istanti di tempo processati. La numerosità del campione è risultata pari a 301.

Il valore medio del Residuo risulta pari a 0.61 mm . Il valore del Residuo Globale risulta pari a 0.72 mm . La media delle differenze lungo z tra il valore inserito e quello calcolato è pari a 0.07 mm , con una trascurabile sovrastima della quota dei punti. Errori dello stesso ordine di grandezza si ottengono nelle altre due coordinate. La media delle differenze lungo x è pari a 0.02 mm , mentre lungo y vale -0.03 mm .

Dal punto di vista pratico, l'operatore ha la necessità di dedicare un notevole sforzo finalizzato a rendere minimo l'errore di posizionamento di ogni Control Point. Questo viene attuato aggiustando manualmente, nello spazio immagine, la posizione del marker relativo al GCP e verificando, successivamente alla elaborazione fotogrammetrica, l'errore residuo.

D'altra parte, un errore piccolo nello spazio immagine non significa necessariamente grande accuratezza nello spazio oggetto, a causa degli errori che possono derivare da una taratura non sufficientemente precisa delle ottiche utilizzate, da una attribuzione non corretta della posizione del GCP nello spazio oggetto o, ancora, dai metodi numerici utilizzati nelle elaborazioni fotogrammetriche.

Quando si verifica una scarsa accuratezza nella descrizione di un GCP, si osserva spesso un errore superiore alla media nei punti circostanti lo stesso. Si rivela spesso utile, in tali casi, non considerare il GCP affetto da errore, ed un suo eventuale reinserimento, alla fine della procedura, sfruttando l'autoposizionamento operato dal software sulla base degli altri GCP inseriti.

Allo scopo di mantenere basso l'errore globale (dovuto alla somma di errori casuali e sistematici) si rende indispensabile un accurato e paziente lavoro di affinamento

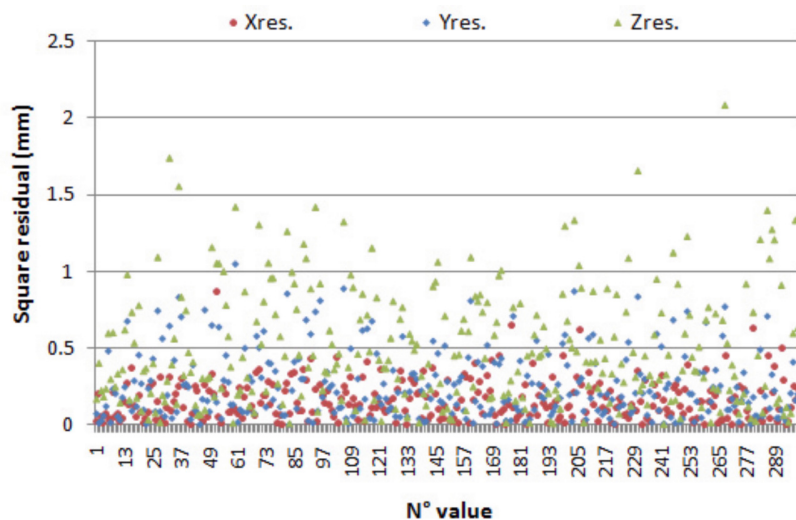


Figura 6.3: Valori assunti dai residui nelle 3 componenti x , y e z .

e consolidamento nella collocazione dei punti di controllo in ciascuna delle istantanee realizzate.

In Figura 6.3 sono riportati i valori delle componenti lungo x , y , z del residuo di tutti i punti del campione considerato. È evidente come la componente lungo z domini rispetto alle altre due componenti.

Per quantificare quanto sopra osservato è stata eseguita una analisi di regressione lineare multipla, considerando come variabili indipendenti le tre componenti del residuo di ogni elemento del campione e come variabile dipendente il Residuo.

La regressione utilizza il metodo dei minimi quadrati per determinare l'equazione del piano che minimizza la somma dei quadrati delle distanze verticali tra i valori del campione e i valori interpolati.

L'analisi di varianza del p-value mostra che il modello di regressione è significativo ad un livello di 0.05. Il p-value per il coefficiente di X , Y e Z è 0, indicando una connessione significativa con RMS . Il valore R^2 spiega il 99.2% della variabilità dei dati. Questo significa che il modello fitta molto bene i dati come è anche giusto immaginare. L'equazione di regressione evidenzia come il fattore più incidente nel $RMSE$ globale sia proprio il residuo lungo l'asse z (Tabella 6.4).

Accanto ad ogni valore dei coefficienti della regressione viene stimato l'errore standard (SE_{coef}) che fornisce una indicazione statistica sulla variabilità del coefficiente. Il valore T di student, può essere utile per determinare quanto 2 gruppi di variabili indipendenti siano simili tra loro. Per essere efficace è necessario che i gruppi di variabili si avvicinino ad una distribuzione normale. Si noti come i coefficienti per la variabile z si discostino dai coefficienti per le variabili x e y , le quali invece si comportano similmente nel contributo al $RMSE$ totale.

L'andamento descrittivo del Residuo risultante dalla regressione lineare multipla è riportato in Figura 6.5. Si nota come alcuni valori del Residuo risultano maggiormente dispersi rispetto agli altri, non tanto da dover essere qualificati come outliers.

RMSE = 0.0299 + 0.444 Xres. + 0.453 Yres. + 0.801 Zres.				
Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.029896	0.003937	7.59	0
Xerr.	0.44443	0.01788	24.85	0
Yerr.	0.45347	0.01401	32.37	0
Zerr.	0.801462	0.008351	95.97	0

S = 0.0369746 R-Sq = 99.2% R-Sq(adj) = 99.2%

Figura 6.4: Parametri statistici ottenuti per la variabile Residuo dalla analisi di regressione lineare multipla per la valutazione della accuratezza delle elaborazioni fotogrammetriche eseguite nel test con materiale granulare grossolano.

In tutte le prove di laboratorio effettuate il valore *RMSE* totale si è mantenuto inferiore al millimetro ad indicare la elevata accuratezza metrica delle misure effettuate.

Nelle applicazioni qui presentate, che mirano alla elevata precisione metrica, risulta fondamentale confrontarsi con i parametri statistici elaborati e forniti a seguito della procedura di bundle adjustment.

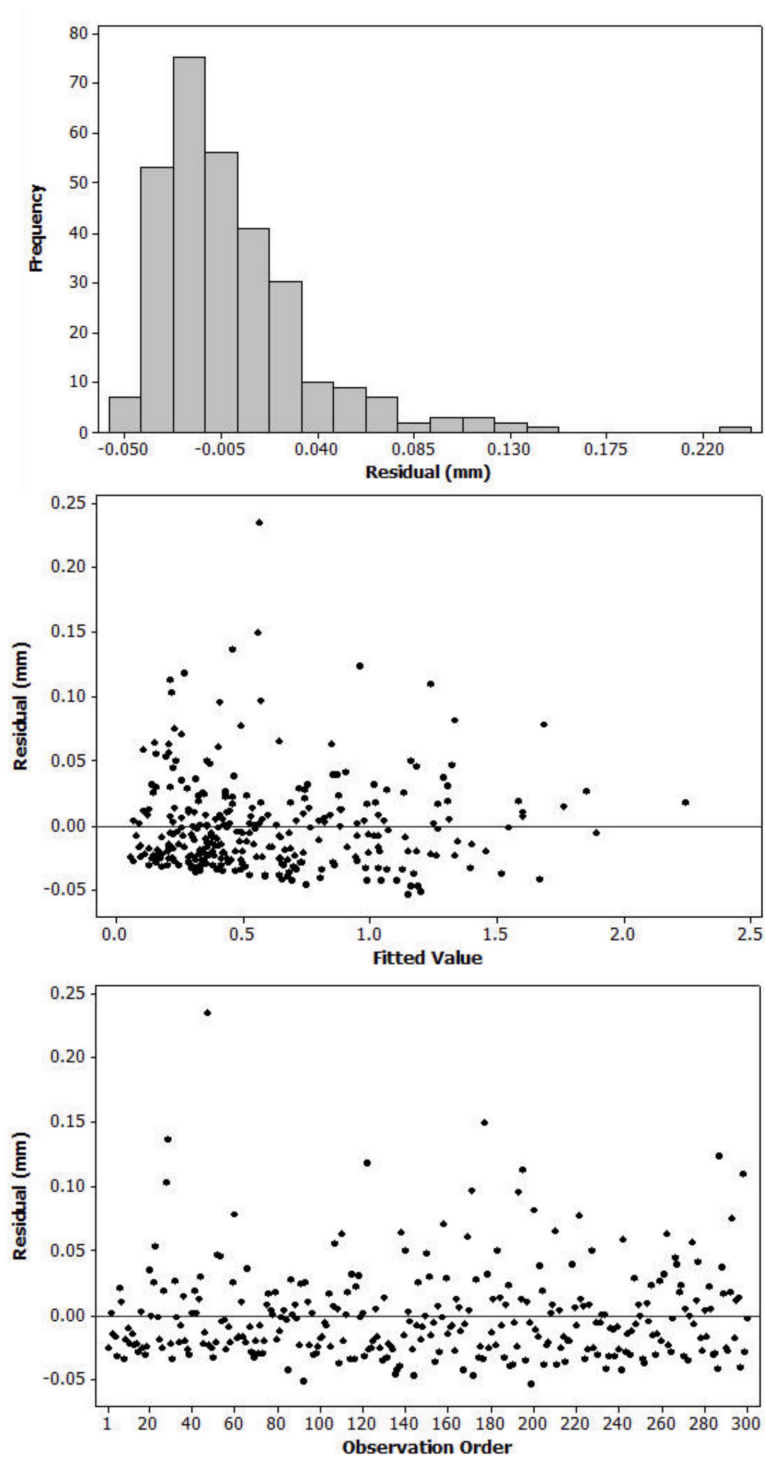


Figura 6.5: Valori dei Residui forniti in output dall'analisi di regressione lineare multipla. Alcuni Residui hanno valori che si discostano in modo abbastanza evidente dagli altri. Nella presente analisi non si è ritenuto comunque giustificata la loro eliminazione come outliers.

Capitolo 7

Debris flow: aspetti reologici ed idrologici

7.1 Introduzione

I debris flow si verificano quando ammassi di sedimenti eterogenei, agitati e saturati con acqua, vengono messi in movimento in risposta all'azione della gravità. Sia la fase solida che la fase liquida influenzano attivamente il movimento, cosa che distingue i debris flow da fenomeni legati come le *rock avalanches* o le *water floods*. Mentre le forze intergranulari dominano la fisica delle valanghe, e le forze tra fluidi dominano la fisica dei *floods*, le due forze agiscono di concerto per produrre i debris flow. Le diverse nomenclature applicate (*debris slides*, *debris torrent*, *debris floods*, *mudflows*, *mudslides*, *hyperconcentrated flows*, *lahar*), riflettono la diversa origine, composizione e aspetto.

Le forze di interazione solido-fluido non soltanto distinguono fisicamente i debris flow, ma conferiscono loro una forza distruttiva unica. Come le valanghe di roccia e le valanghe di neve, i debris flow si verificano con tempi di allarme brevissimi, e possono esercitare carichi impulsivi enormi sugli ostacoli che incontrano.

7.2 I modelli reologici tradizionali

I modelli reologici viscoplastico e granulo inerziale (dilatante) sono tradizionalmente i due modelli utilizzati nel contesto teorico riguardante l'ambito di ricerca sui debris flow (Figura 7.1)

Ognuno di questi afferma un'unica relazione reologica tra lo sforzo di taglio e la velocità di deformazione. Alcune proprietà sono però in contrasto con i dati che mostrano come gli sforzi solidi e liquidi varino in modo non sincrono deducendo che variando la pressione dei pori e le temperature granulari il comportamento dei debris flows viene influenzato.

Il primo tentativo di sviluppo per una migliore comprensione fisica del fenomeno dei debris flow fu compiuta da Johnson [1965] e Yano e Daido [1965], che riconobbero indipendentemente come esibissero sia proprietà di viscosità del fluido, sia proprietà di plasticità delle componenti solide.

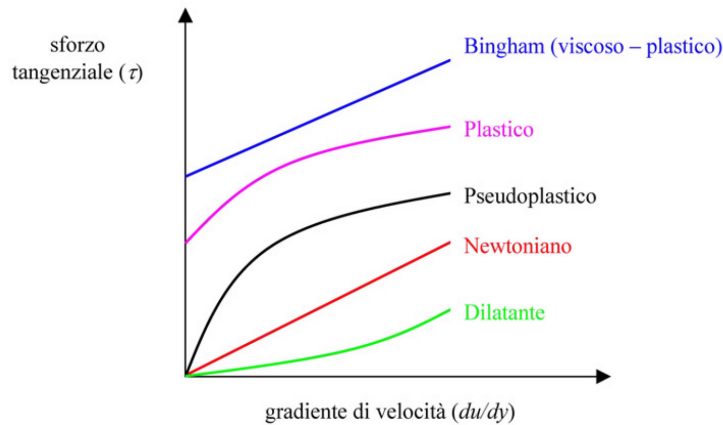


Figura 7.1: Modelli reologici per diversi tipi di colata.

7.2.1 Il modello di viscoplastico

La relazione del modello di Bingham può essere espressa come

$$\tau = s + \mu \left(\frac{du}{dy} \right) \quad (7.1)$$

dove p è la pressione dinamica della miscela. Nel caso di flusso iperconcentrato la concentrazione di sedimenti è più bassa che nei debris flow e l'equazione si può ridurre a $s = c$. Gli esperimenti effettuati da Chen mostrarono quindi come i parametri di Bingham variano con la concentrazione del sedimento lungo la profondità e con la composizione, introducendo un modello che tiene conto anche della coesione c della mistura. Questo modello può essere considerato un'estensione del modello originale di Bagnold.

Johnson [1965, 1970, 1984] adottò il più semplice modello meccanico che combina sia attributi plastici che viscosi, ovvero il modello di Bingham. Questo modello descrive un materiale monofase che rimane rigido o elastico, a meno che uno sforzo deviatorico non superi un valore di soglia, il limite di snervamento. Laddove lo sforzo superasse lo sforzo di taglio critico s , il materiale scorrerebbe come un fluido viscoso. Il modello di Bingham per i debris flow può essere generalizzato, per permettere allo sforzo di snervamento di dipendere dall'angolo d'attrito Coulombiano (eq. 7.2) e alla viscosità di dipendere dalla velocità di deformazione [Iverson, 1985; Coussot and Piau, 1994, 1995]. Confrontando la distribuzione dello sforzo tangenziale mobilitato alla resistenza viscosa del materiale espressa dalla relazione (7.1), è possibile definire il profilo delle velocità, distinguendo all'interno del flusso 2 strati. Indicando con θ l'angolo di inclinazione del fondo e con h lo spessore del flusso, lo sforzo tangenziale mobilitato alla profondità z si esprime come:

$$s = c \cos \phi + p \sin \phi \quad (7.2)$$

dove p è la pressione dinamica della miscela. Nel caso di flusso iperconcentrato la concentrazione di sedimenti è più bassa che nei debris flow e l'equazione si può ridurre a $s = c$. Gli esperimenti effettuati da Chen dimostrarono quindi come i parametri di Bingham variano con la concentrazione del sedimento lungo la profondità e con la composizione, introducendo un modello che tiene conto anche della coesione c della mistura. Questo modello può essere considerato un'estensione del modello originale di Bagnold.

Johnson [1965, 1970, 1984] adottò il più semplice modello meccanico che combina sia attributi plastici che viscosi, ovvero il modello di Bingham. Questo modello descrive un materiale monofase che rimane rigido o elastico, a meno che un sforzo deviatorico non superi un valore di soglia, il limite di snervamento. Laddove lo sforzo superasse lo sforzo di taglio critico s , il materiale scorrerebbe come un fluido viscoso. Il modello di Bingham per i debris flow può essere generalizzato, per permettere allo sforzo di snervamento di dipendere dall'angolo d'attrito Coulombiano (eq. 7.2) e alla viscosità di dipendere dalla velocità di deformazione [Iverson, 1985; Coussot and Piau, 1994, 1995], ma le applicazioni del modello di Bingham devono invariabilmente assumere viscosità e s fissi. Confrontando la distribuzione tangenziale dello sforzo tangenziale mobilitato alla resistenza viscosa del materiale espressa dalla relazione (7.1), è possibile definire il profilo delle velocità, distinguendo all'interno del flusso 2 strati. Indicando con θ l'angolo di inclinazione del fondo e con h lo spessore del flusso, lo sforzo tangenziale mobilitato alla profondità z si esprime come:

$$\tau_z = \rho g (h - z) \sin \theta \quad (7.3)$$

Conseguentemente si ottiene:

$$\begin{aligned} \tau(z) \leq s &\implies \frac{\partial v_x}{\partial x_3} = 0 \\ \tau(z) > s &\implies \frac{\partial v_x}{\partial x_3} = \frac{\tau(z) - s}{\mu} \neq 0 \end{aligned} \quad (7.4)$$

relazioni che individuano uno strato di spessore h_p (plug), entro il quale lo sforzo tangenziale è inferiore alla rigidità, la variazione di velocità è nulla e l'intero strato si muove in modo rigido trasportato dallo strato inferiore, ed uno strato inferiore, di spessore h_s , nel quale il gradiente di velocità cresce linearmente con la profondità e la velocità ha distribuzione parabolica (Figura 7.2).

Il modello di Bingham spiega alcune caratteristiche tipiche delle colate quali, ad esempio, l'esistenza di una regione centrale della corrente, dove lo sforzo tangenziale è inferiore alla resistenza al taglio, cosicché in questa regione non avviene alcuna deformazione (rigid plug). Questa zona rigida, limitata lateralmente da zone più o meno larghe soggette a flusso laminare, è stata osservata e descritta da diversi autori e, inoltre, spiega la caratteristica forma ad U assunta dal canale dopo il passaggio di una colata. Anche la formazione di argini e lobi laterali su pendenze relativamente elevate può essere spiegata in termini di resistenza del materiale: quando lo spessore del flusso si assottiglia, sino ad un valore minimo critico h_s , il debris flow si arresta. Distribuzioni di velocità che concordano con il modello di flusso di Bingham sono state misurate sia su correnti sperimentali sia in colate detritiche naturali (Marchetti, 2000).

Una formulazione diversa per i fluidi quasi-plastici fu data da Herschel e Bulkley (1926) secondo i quali lo sforzo tangenziale di resistenza al moto era proporzionale ad un coefficiente m di consistenza del mezzo (eq. 7.5). Il fluido, dopo il raggiungimento di uno sforzo tangenziale di soglia, si deforma in modo non-newtoniano. La formulazione analitica è la seguente:

$$\tau = s + m \left(\frac{du}{dy} \right)^\eta \quad (7.5)$$

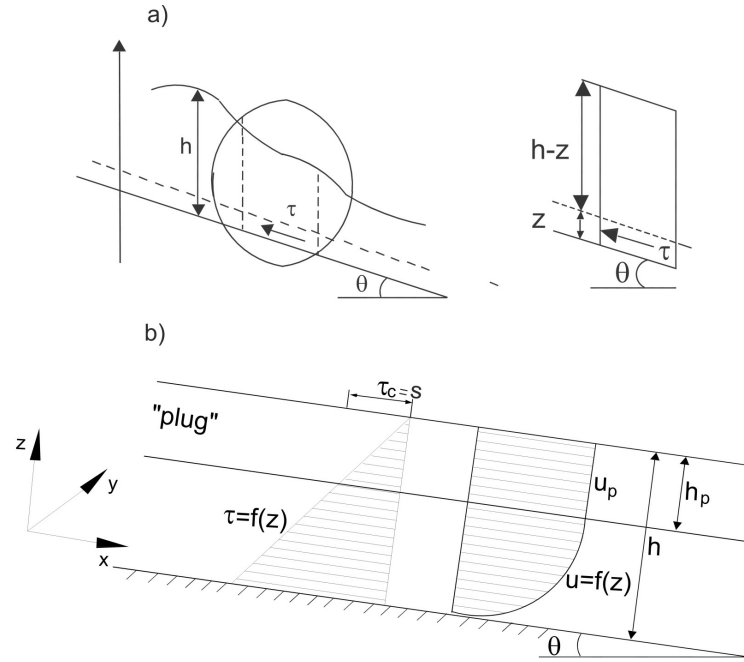


Figura 7.2: a) schema delle forze che agiscono sull'equilibrio di un flusso; b) distribuzione dello sforzo di taglio e della velocità per un fluido di Bingham su pendio infinito.

con s sforzo critico e m e η costanti caratteristiche del materiale: m è un coefficiente di consistenza maggiore di zero, η è un esponente compreso tra 0 e 1 che assume normalmente valori tra 0.3 e 0.6. Se l'esponente $\eta = 1$ e m tende al valore μ si ottiene l'eq. 7.1, che rappresenta il fluido plastico di Bingham. Valori sperimentali dei parametri reologici del modello di Herschel e Bulkeley sono riportati nella Figura 7.3.

Un difetto fondamentale del modello di Bingham a tensione di snervamento fissa è che tali modelli simulano la reologia della frazione fine mista ad acqua, laddove i dati e le osservazioni mostrano che le interazioni di sedimenti a granulometria grossolana tra di loro e con il fluido adiacente influenzano in modo determinante il comportamento di un debris flow [Costa e Williams, 1984; Major and Pearson, 1992]. Infatti gli esperimenti condotti su canalette sperimentali di grandi dimensioni utilizzando miscele ad elevato contenuto in sabbie, ghiaie ed acqua, con un contenuto di materiale fine in piccola percentuale (comparabile alla maggior parte dei debris flow naturali), mostrano che aumentando il contenuto di materiale fine, aumenta sia lo spessore dei lobi, sia la resistenza apparente, poiché il materiale fine aiuta a mantenere una pressione dei pori alta che riduce la resistenza attritiva, e favorisce la diffusione dei lobi [Major, 1996].

Anche se posto in una forma molto generale i modelli alla Bingham presentano dei limiti molto evidenti. Essi assumono che la dissipazione dell'energia nei debris flow avvenga soltanto grazie alla viscosità (viscous shearing). Inoltre negano la possibilità che la dissipazione dell'energia possa avvenire indipendentemente dalla velocità, quando cioè i grani vengono a contatto l'un l'altro, così come il flusso della parte fluida connessa alla struttura granulare. I modelli di tipo Bingham impiegano generalmente condizioni al contorno di non scivolamento fluido-meccanico. Questa condizione dovrebbe portare ad una continua deposizione di materiale lungo il percorso il che non avviene comunemente nella realtà.

*CS	**CS _s	τ _c (Pa)	^m (Pa s ⁿ)	n	μ (Pa s)
<i>Rapporto tra limo-argilla e sabbia 11:1</i>					
0.53	0.04	147	15.4	0.9	10
0.52	0.04	145	0.5	1.3	1.4
0.5	0.04	32	16.5	0.3	0.5
0.49	0.04	60	0.1	1.5	0.4
<i>Rapporto tra limo-argilla e sabbia 5.5:1</i>					
0.53	0.08	151	0.6	0.8	0.3
0.51	0.08	27	9.2	0.3	0.9
0.51	0.08	26	10.1	0.3	0.4
0.5	0.08	33	0.2	2.1	1.8
<i>Rapporto tra limo-argilla e sabbia 3.5:1</i>					
0.54	0.12	75	17.5	0.4	0.5
0.54	0.12	64	13.8	0.3	0.7
0.54	0.12	103	-	-	-
0.52	0.12	48	0.1	2	1.3
<i>Rapporto tra limo-argilla e sabbia 2:1</i>					
0.59	0.2	186	2.6	1.4	8.3
0.57	0.19	131	-	-	-
0.56	0.19	79	4.8	0.6	0.8
0.56	0.19	114	0.4	1.2	0.9
0.55	0.18	33	8.7	0.3	0.3
<i>Rapporto tra limo-argilla e sabbia 1:1</i>					
0.61	0.31	267	0.4	2.5	27.9
0.61	0.31	320	0.01	3.3	12.8
0.59	0.3	147	-	-	-
0.57	0.29	72	0.1	1.6	0.5
0.56	0.28	44	4.1	0.4	0.2
<i>Rapporto tra limo-argilla e sabbia 1:4.5</i>					
0.66	0.54	405	12.4	1.1	15.2
0.65	0.53	279	-	-	-
0.63	0.52	133	5.5	0.5	0.8

$$*CS = \frac{V_{SAND} + V_{FF}}{V_T}; \quad **CS_s = \frac{V_{SAND}}{V_T};$$

Figura 7.3: Valori dei parametri per il modello di Herschel e Bulkley (da Major e Pierson, 1992);

Invece i grani possono scivolare, collidere, e ruotare lungo i limiti di flusso. I grani visibili sulla superficie dei debris flow possono sia impattare energicamente o rimanere statici formando un rigid plug che dipende dalla temperatura granulare, che dipende a sua volta dalla velocità del flusso, dalla composizione e dalle condizioni al contorno. I modelli che mirano a simulare debris flow reali devono tenere conto di queste condizioni.

7.2.2 Reologia della fase granulare

Per tenere in considerazione l'interazione tra i grani, Takahashi (1978, 1980, 1981) sfruttò i risultati di Bagnold per sviluppare un modello di flusso granulo-inerziale di debris flow. Dai suoi esperimenti e da semplici analisi di collisione tra grani, Bagnold dedusse che lo sforzo normale e lo sforzo di taglio nelle sospensioni variavano o alla seconda potenza o linearmente rispetto alla velocità di taglio sulla base del valore assunto dal numero di Bagnold, $N_{Bag.}$, usando il termine granulo-inerziale o macroviscoso rispettivamente (eq. 7.6):

$$N_{Bag.} = \frac{\rho_s \sqrt{\lambda d_{50}^2} du}{\mu dy} \quad (7.6)$$

Il numero di Bagnold rappresenta il rapporto tra le forze inerziali e le forze viscosi, e può quindi essere considerato l'equivalente per una miscela solido-liquido del numero di Reynolds. Bagnold ha poi introdotto un nuovo parametro adimensionale G_b definito come:

$$G_b = \frac{\rho_s d \sqrt{\frac{\tau}{\rho_s \lambda}}}{\mu} \quad (7.7)$$

con τ tensione tangenziale. Sulla base di questi 2 parametri adimensionalizzati Bagnold distinse 2 aree a ciascuna delle quali corrisponde una differente meccanica del fenomeno:

- per $N_{Bag.} < 40$ il regime di moto viene definito macroviscoso: esso è generalmente laminare e caratterizzato dalla prevalenza delle dissipazioni di tipo viscoso rispetto a tutte le altre;
- per $N_{Bag.} > 450$ il regime di moto viene definito granulo-inerziale: esso è considerato turbolento e le dissipazioni predominanti sono legate alle collisioni fra i grani;
- per $40 < N_{Bag.} < 450$ il regime di moto è transitorio in cui la dipendenza dello sforzo rispetto al gradiente di velocità passa progressivamente da lineare a quadratica.

Uno dei primi schemi concettuali proposti per la meccanica dei fluidi granulari è il modello delle pressioni dispersive proposto da Bagnold nel 1954. La teoria di Bagnold presenta dei limiti anche concettuali, che sono stati analizzati nella letteratura, anche recente (Hunt et al., 2002). Questa teoria ha tuttavia il pregio della semplicità e di essere stata la prima ad avere indicato chiaramente la fisica del fenomeno. Inoltre essa è stata ampiamente applicata ai miscugli granulari governati dalla gravità in generale ed alle colate di detriti in particolare.

Teoria delle pressioni dispersive di Bagnold (1954)

Secondo Bagnold gli urti tra le particelle mediati nel tempo, concorrono a formare una pressione dispersiva nel campo di moto che dipende sostanzialmente dalla distanza media relativa tra i grani. Per descrivere questa distanza Bagnold ha introdotto la concentrazione lineare λ , che, con riferimento a particelle sferiche uniformemente distribuite, è rappresentata dal rapporto tra il diametro della particella d_p , e la distanza media s tra le particelle $\lambda = d_p/s$ (Figura 7.4).

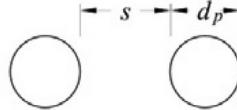


Figura 7.4: Definizione di concentrazione lineare $\lambda = d_p/s$.

Per le particelle sferiche la concentrazione lineare è legata alla *concentrazione di volume* c dalla seguente relazione:

$$\lambda = \frac{c^{1/3}}{c_*^{1/3} - c^{1/3}} \quad (7.8)$$

dove c_* è la concentrazione di volume massima possibile, *concentrazione di massimo impaccamento*, che si ottiene ponendo le sfera nella disposizione cosiddetta a *palle di cannone*. In questo caso, $c_* = \pi/3/\sqrt{2} = 0.74$. Sulla base di misure sperimentali fatte in un viscosimetro con particelle sferiche leggere, Bagnold è giunto alla conclusione che per velocità di deformazione sufficientemente elevate, la relazione tra la pressione dispersiva e velocità di deformazione è di tipo quadratico, ed è esprimibile, per un moto piano (x_1, x_2) , quasi-unidirezionale in x_1 , con la seguente relazione:

$$p^{g-col} = a \cos \phi \rho_s \left(\lambda d_p \frac{\partial u_1^g}{\partial x_2} \right)^2 \quad (7.9)$$

dove ϕ rappresenta l'angolo di *attrito dinamico* che secondo Bagnold si mantiene sensibilmente costante in questo regime. Il termine a rappresenta una costante sperimentale (secondo le esperienze di Bagnold $a = 0.042$). Il regime di moto delle particelle che si presenta in queste condizioni è stato chiamato da Bagnold regime granulo-inerziale. Gli esperimenti condotti in laboratorio da Bagnold dimostrarono che quando una miscela con una concentrazione relativamente alta di solidi granulari è in movimento, le particelle più grossolane tendono a migrare verso la superficie. Questo risulta dal sollevamento prodotto quando, per effetto di collisioni, vengono trasmesse forze tra le particelle. Bagnold chiamò pressione dispersiva (p) questa forza di sollevamento e trovò che essa è direttamente proporzionale al quadrato del diametro di una particella e al gradiente di velocità. Secondo il modello Bagnoldiano dunque la pressione dispersiva dipende dalla velocità di deformazione. Questa ipotesi non è però generalizzabile, perchè è facile immaginare moti dotati di pressioni dispersive non legate ai gradienti di velocità. La pressione dispersiva è indotta da uno sforzo tangenziale dispersivo, legato alla pressione dispersiva da una relazione di tipo coulombiano.

$$\tau_{12}^{g\text{-col}} = a \sin \phi \rho_s \left(\lambda d_p \frac{\partial u_1^g}{\partial x_2} \right)^2 \quad (7.10)$$

Si noti che il rapporto tra lo sforzo tangenziale e quello normale è di tipo coulombiano:

$$\frac{\tau_{12}^{g\text{-col}}}{p^{g\text{-col}}} = \tan \phi \quad (7.11)$$

Un aumento del diametro della particella comporterebbe un aumento della pressione dispersiva; poiché quindi le forze dispersive agiscono più intensamente sulle particelle più grosse e nelle zone dove lo sforzo di taglio è massimo, i blocchi più grossolani tendono a migrare verso il fronte e verso la superficie del debris flow. Questo è quanto si osserva comunemente nei depositi da colata detritica.

Il contributo di Takahashi riguardo la fisica dei debris flow, è rivolta soprattutto alla relazione di velocità sforzo-deformazione di Bagnold per il regime granulo inerziale. Altri ricercatori (Davies, 1986) difesero la teoria di Bagnold per il regime macroviscoso come un modello per i debris flow. In realtà l'utilizzo delle equazioni di Bagnold come equazioni costitutive di un flusso qualsiasi porta risultati contraddittori. Ad esempio infatti, utilizzando particelle di densità uguale a quella del fluido si mascherano gli effetti della gravità che in un flusso granulare dovrebbe agire determinando sforzi crescenti con la profondità.

Riassumendo si può concludere che è più appropriato parlare di reologia riferendosi a flussi di materiale fine o al limite a debris-flow viscosi. Per quanto riguarda invece i flussi di materiale granulare le leggi reologiche sono inadatte a descriverne il comportamento a livello macroscopico. Le contraddizioni rilevate sia nei modelli di flusso viscoplastico che granulo inerziale hanno motivato i ricercatori verso nuovi approcci ma progressi definitivi in tal senso non sono stati ancora compiuti.

7.3 Classificazione dei debris flow

La classificazione formulata da Ancey (1999) basata sul legame tra la forma del deposito (evidenze geomorfologiche) e le proprietà meccaniche della colata risulta particolarmente interessante. Ancey propone una suddivisione in tre classi (viscosa, viscoplastica ed a comportamento frizionale) e tenta di relazionare le proprietà reologiche a quelle geomorfologiche (Figura 7.5).

Le osservazioni effettuate in campo mostrano che ognuna di queste classi reologiche, in accordo con la classificazione di Ancey, può essere correlata con parametri come la pendenza di arresto, forma ed esposizione del deposito e distribuzione granulometrica (Bardou et al., 2003). Ciò rende possibile il collegamento tra le osservazioni dirette di campagna e le proprietà meccaniche del fluido;

I disegni delle sezioni arginali vengono inclusi poichè sono proprio queste le evidenze residue evidenti dopo il passaggio della colata detritica, quantomeno nei debris flow alpini, dove la conformazione valliva impedisce il mantenimento del fronte e del corpo.


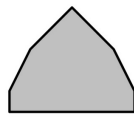

Meccanica	Nome scientifico	viscoplastico	collisionale-frizionale	frizionale-viscoso
	Modello reologico appropriato	Herschel-Bulkley Bingham	Coulomb, equazione costitutiva del collisionale-frizionale	Coulomb a bassa velocità Newtoniano (<i>power law</i>) a elevata velocità
Osservazione in campo	Nome comune	fangosa	granulare	fluida
		regolare, con limiti ben definiti, molto coesivo da secco	irregolare, senza limiti netti, non coesivo da secco	come un terrazzo alluvionale, molto coesivo da secco
	Forma del deposito			
		sezione arginale	sezione arginale	sezione a corpo intero (scala diversa rispetto al disegno di quelle arginali)
	Pendenza di arresto	< 2°	< 10°	< 1°
Granulometria	fraz. grossolana ++ matrice fine ++ argilla +	fraz. grossolana ++ matrice fine - argilla - -	fraz. grossolana - / + matrice fine ++ limo + argilla - -	

Figura 7.5: Classificazione reofisica dei debris flow [Ancey, (1999) e Bardou, (2003)].

7.4 Aspetti generali di un debris flow

Le colate detritiche si caratterizzano per il ruolo fondamentale che gioca la frazione liquida nella movimentazione e trasporto del materiale, ma anche nella determinazione della velocità del moto. La mancanza di una fase liquida impedisce ai movimenti franosi e valanghe di roccia di raggiungere velocità elevate se non per pendenze elevate. Le colate detritiche, d'altra parte, possono assumere velocità anche molto basse per pendenze lievi. In generale possono variare tra 0.5 m/s (talvolta anche inferiori) e 10 m/s .

I debris flow sono fenomeni non stazionari e danno sovente luogo ad impulsi successivi (Iverson, 1997). Gli impulsi possono avvenire a distanza di pochi secondi tra di loro ma possono essere intervallati anche di ore, con durata della singola onda, che può variare tra alcuni secondi ed alcuni minuti (Rickenmann e Zimmermann, 1993).

Un generico impulso, è spesso caratterizzato dalle seguenti peculiarità (Figura 7.6):

- un fronte parzialmente saturo, dove si concentrano i sedimenti a granulometria maggiore (Costa, 1984, Major, 2000);
- un corpo più fluido, a carattere macroviscoso, una coda a carattere più iperconcentrato. La presenza di un corpo viscoso, è stata osservata sia in modellazioni fisiche a larga scala (Iverson, 1997) che in modellazioni a piccola scala (Kaitna, 2006). Nella coda le concentrazioni solide sono ridotte.

Quando la colata detritica esce dal suo confinamento laterale, sia esso il canale principale oppure piccoli dislivelli interni al canale, si osserva la presenza di argini laterali che difficilmente vengono erosi dal corpo e dalla coda del debris flow. Anzi, spesso vengono

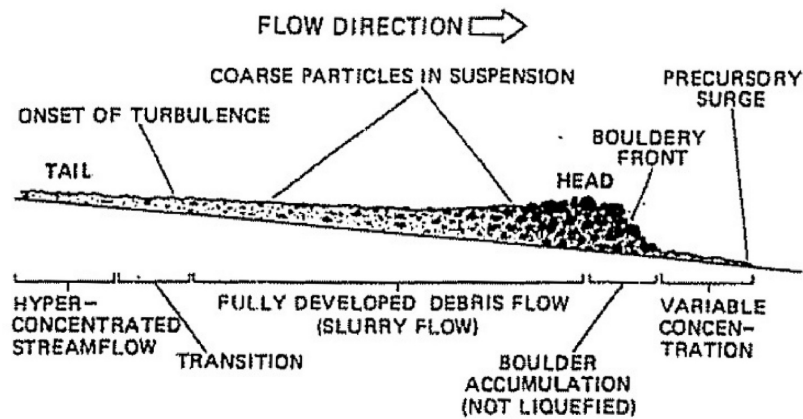


Figura 7.6: Schema di una colata detritica (Pierson, 1986).

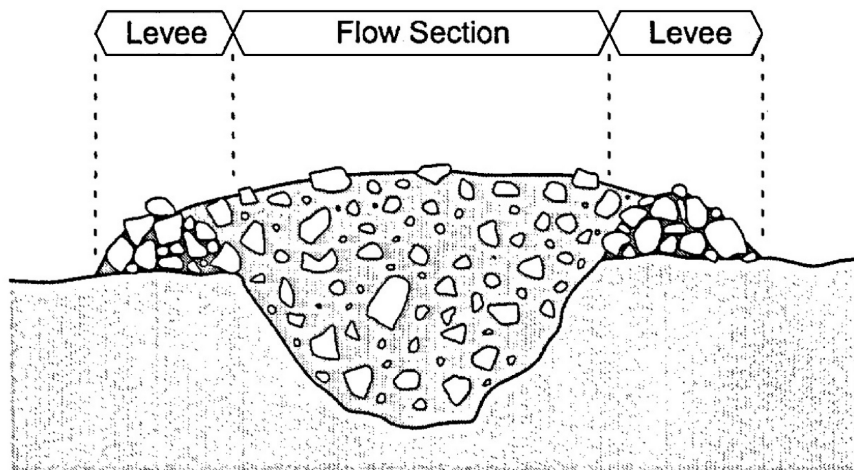


Figura 7.7: Sezione laterale di una colata detritica (Schatzmann, 2005).

a svilupparsi dei lobi laterali secondari che si depositano in un tempo ed in un'area indipendentemente dal corpo principale (Figura 7.7).

La formazione di un debris flow è legata al contemporaneo verificarsi di 3 condizioni:

- la disponibilità di materiale sul fondo del canale, proveniente dalle sponde dello stesso in seguito a dissesti;
- apporto d'acqua per la mobilitazione dei sedimenti;
- pendenza del canale tale da rendere efficace l'azione della gravità.

Le colate detritiche possono essere innescate da più meccanismi. Una frana può ad esempio confluire nel canale da una sponda e innescare un movimento fluido ricco d'acqua. Oppure è la frana stessa ad ostacolare il ruscellamento superficiale sul fondo del canale, caricandosi progressivamente d'acqua e subendo la diminuzione della resistenza al taglio complessiva dell'ammasso. Talvolta sono generate, in alvei incisi e su forti pendenze, da

una forte corrente critica che, grazie al progressivo apporto di sedimenti, che provengono dall'erosione del fondo e delle sponde del canale, evolve in colata detritica. Il potere erosivo del debris flow è determinante per lo sviluppo volumetrico lungo il suo percorso; oltre che dalle caratteristiche reologiche del flusso, questo è influenzato anche dalle condizioni pregresse di saturazione del fondo del canale.

7.4.1 Condizioni idrologiche d'innescò

La durata, associata all'intensità, della pioggia è uno dei parametri principali per la previsione dell'innescò di colate detritiche. Questa è normalmente monitorata e registrata presso stazioni pluviometriche distribuite sul territorio. In particolare, con i dati real-time provenienti dalle stazioni di monitoraggio, viene valutata l'intensità di precipitazione rispetto alla durata dell'evento. Gli effetti degli eventi di pioggia (intensità media e massima oraria, durata e cumulata) sull'innescò dei debris flow è stata studiata negli anni da numerosi autori (Dhakal and Sidle, 2004; Aleotti, 2004; Cannon and Ellen, 1985).

La combinazione di intensità e durata della pioggia si può rapportare al bilancio tra la velocità di infiltrazione della pioggia e quella drenata fuori dal bacino (Campbell, 1975). Altre informazioni derivanti ad esempio dalle piogge antecedenti, dalla durata, dall'intensità e dalla cumulata totale, sono stati utilizzati per determinare una soglia critica di pioggia

Il grafico visualizzato in Figura 7.8, plotta alcuni eventi critici di innescò di debris flow con le relative precipitazioni ed intensità, confrontati con alcune linee critiche di innescò, suggerite da alcuni autori (Caine, 1980; Cancelli and Nova, 1985; Wieczorek, 1987; Ceriani et al., 1992, 1994). Yuan et al., nel 2005, proposero un interessante confronto tra gli eventi innescati valutando le diverse caratteristiche di pioggia, determinate da perturbazioni atmosferiche in contesti meteorologici diversi. I debris flow indotti da piogge intermittenti, nella regione di Taiwan, sono determinati da piogge totali superiori (Figura 7.9).

L'analisi degli eventi piovosi, sono dati fondamentali per l'analisi delle soglie di trigger. La valutazione di una legge matematica che definisca questa soglia rimane tuttavia di difficile identificazione a causa del continuo variare delle condizioni al contorno che governano le condizioni di bacino sia a piccola scala che a grande scala. A questo si aggiunge la difficoltà di disporre di un numero statisticamente importante di osservazioni, a causa delle condizioni impervie che ostacolano una acquisizione continua.

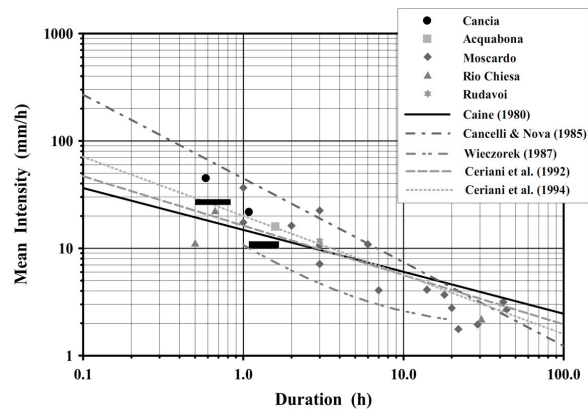


Figura 7.8: Intensità di precipitazione rispetto alla durata dell'evento per alcuni siti di monitoraggio dolomitici.

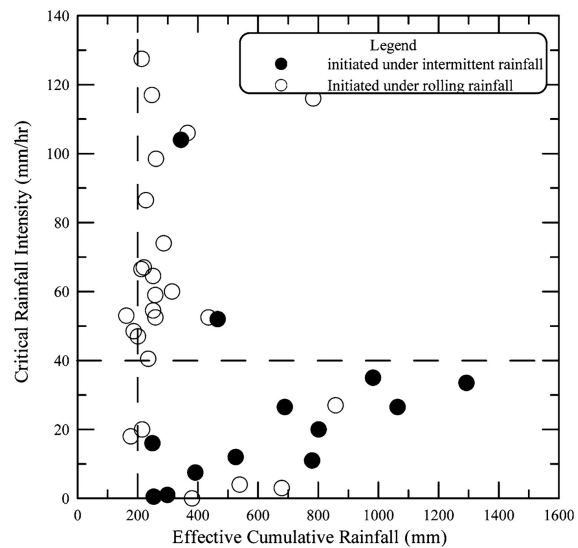


Figura 7.9: Intensità di pioggia critica e pioggia cumulata di innesco (Yuan,2005).

Capitolo 8

Il sistema di monitoraggio

8.1 Inquadramento generale

Il sito di Acquabona è situato nelle Alpi Orientali, nelle vicinanze di Cortina d'Ampezzo in provincia di Belluno. Nella parte alta del bacino è caratterizzato da ripide pareti rocciose dolomitiche di età tardo triassica e giurassica. Nella parte sottostante, scendendo verso il fondo vallivo, domina una potente copertura di materiale eterogeneo, deposito di versante e da debris flow, con presenza di massi anche di dimensioni notevoli, superiori ai 3 metri. Affioramenti relativi alla Formazione di Travenanzes (Raibl), e alla Formazione di Durrenstein sono visibili parzialmente nella parte medio alta del versante detritico, specialmente in corrispondenza del canale di scorrimento di colate detriche del rio Acquabona (Figura 8.1). Il canale è quasi per intero inciso nei depositi suddetti, tranne che per un breve tratto ripido dove la successione stratigrafica della Formazione del Raibl viene incisa direttamente.

8.2 Cenni storici

Una descrizione dettagliata dal punto di vista geologico e geomorfologico del sito, viene affrontata in modo esaustivo da Berti et alii (1999) e Genevois et alii (2000a) [12] [2].

Il sito, la cui attività è per lo più annuale, è stato equipaggiato già agli inizi degli anni '90, allo scopo di caratterizzare la fase di innesco, scorrimento e deposizione tipica delle colate detritiche delle zone dolomitiche.

Le condizioni idrologiche che portano alla formazione delle colate di detriti sono state studiate attraverso l'utilizzo di pluviometri e sensori di pressione (Genevois et alii, 2000b [21]; Berti & Simoni, 2003 [11] e 2005 [5]; Armento et alii, 2007 [29], [33], [7] e Gregoretto e Dalla Fontana, 2008 [19]).

Sono state effettuate misure di velocità del fronte, misure di distribuzione superficiale delle velocità, utilizzando immagini provenienti da videocamere o sfruttando le vibrazioni indotte dallo scorrimento e dallo scontro tra le particelle e misurate dai geofoni (Genevois et alii, 2000c) [22], (Tecca et alii, 2003) [40].

Sono state proposte relazioni tra la profondità del flusso, le vibrazioni indotte dal flusso e la velocità del fronte, ed è stato stimato il volume delle colate di detriti basandosi sull'integrale della misura delle vibrazioni del terreno (Galgaro et alii, 2005) [20].

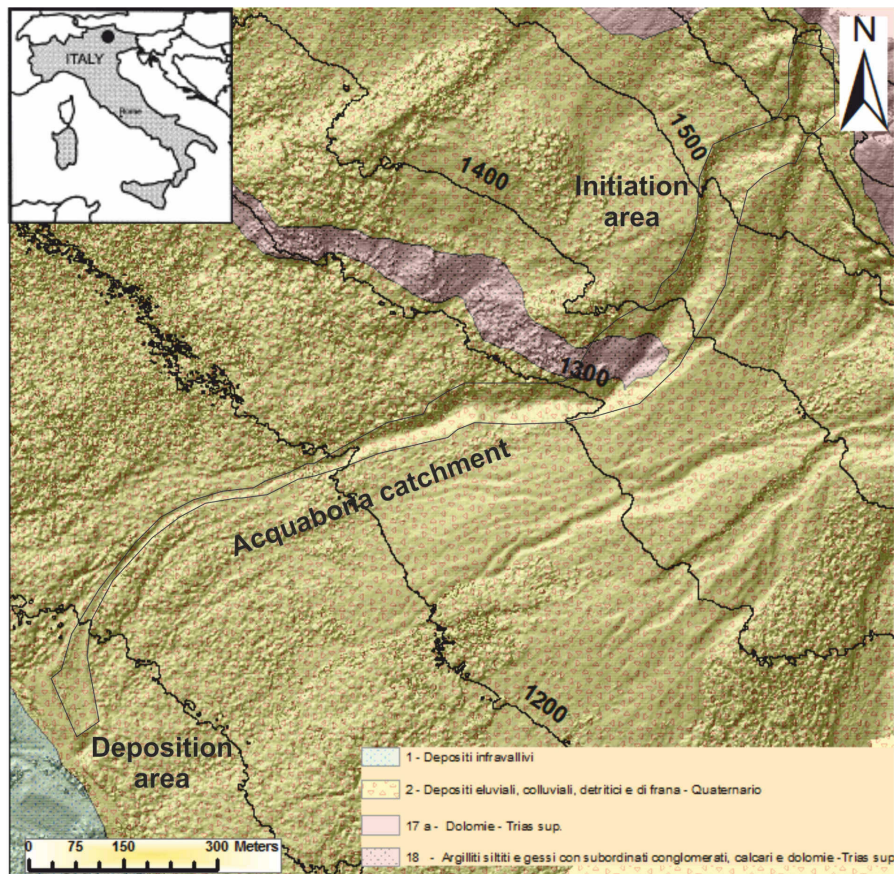


Figura 8.1: DTM relativo al bacino di scorrimento del debris flow, dalla zona di innesco alla zona di deposizione del materiale. L'elaborazione fotogrammetrica che ha portato alla definizione dell'immagine è stata ricavata da immagini aeree del 2006, disponibili sul portale del sito della Regione Veneto. L'andamento irregolare delle curve di livello è causato dalla fitta presenza di vegetazione bassa tipica di zone aride e secche in versante esposto a Sud dove la formazione di suolo è ridotta.

Sul materiale detritico sono stati effettuati test di laboratorio allo scopo di definire i processi di deposizione (Deganutti et alii, 2003) [17]. Gli eventi registrati sono stati sfruttati per testare modelli numerici uni-dimensionali (Papa & Lamberti, 1999) [3]; (Fraccarollo & Papa, 2000) [28] e per simulare il comportamento dinamico unidimensionale (*DAN - W*) e bidimensionale (*FLO 2D*).

Analisi di pericolosità delle colate di detriti sono state elaborate basandosi sulla combinazione di dati di campo e dati derivanti da elaborazioni numeriche (Genevois et alii, 2009) [14].

Il sistema di monitoraggio installato ha subito numerose modifiche negli anni ed è stato completamente distrutto da una colata verificatasi nel 2009.

8.2.1 Il primo sistema di monitoraggio, 1997

Il primo sistema di monitoraggio è stato progettato nella seconda metà degli anni '90 in collaborazione con l'*USGS* (Figura 8.2).

Sono state realizzate 3 stazioni di monitoraggio (Simoni, 1998) [4]. La stazione più a monte è stata localizzata nella zona d'innescò, ad una quota di circa 1565 m s.m.m.

Alla stazione è stato installato un pluviometro, un geofono per l'attivazione del sistema di monitoraggio in occasione di eventi, 4 trasduttori di pressione dell'acqua, 2 videocamere e 2 registratori, attivati in caso di raggiungimento della soglia di trigger del geofono.

La stazione di monitoraggio intermedia è stata posizionata nella zona di scorrimento, ad una quota di circa 1310 m s.m.m. Qui la strumentazione comprendeva 3 geofoni, distanti uno dall'altro circa 100 m, ed un anemometro.

La stazione di valle è stata localizzata alla fine della zona di scorrimento, ad una quota di circa 1175 m s.m.m.

Alla stazione sono stati montati 3 geofoni, un distanziometro ad ultrasuoni, un sistema di misura delle pressioni totali (da 0 kPa a 300 kPa), un trasduttore di pressione dell'acqua ed una videocamera.

Ogni stazione è stata alimentata mediante una batteria a 12 V collegata a dei pannelli fotovoltaici. Un radio trasmettitore e ricevitore permetteva il collegamento con la stazione di raccolta dati presso Socol, località situata a poco più di un km dal sito di monitoraggio.

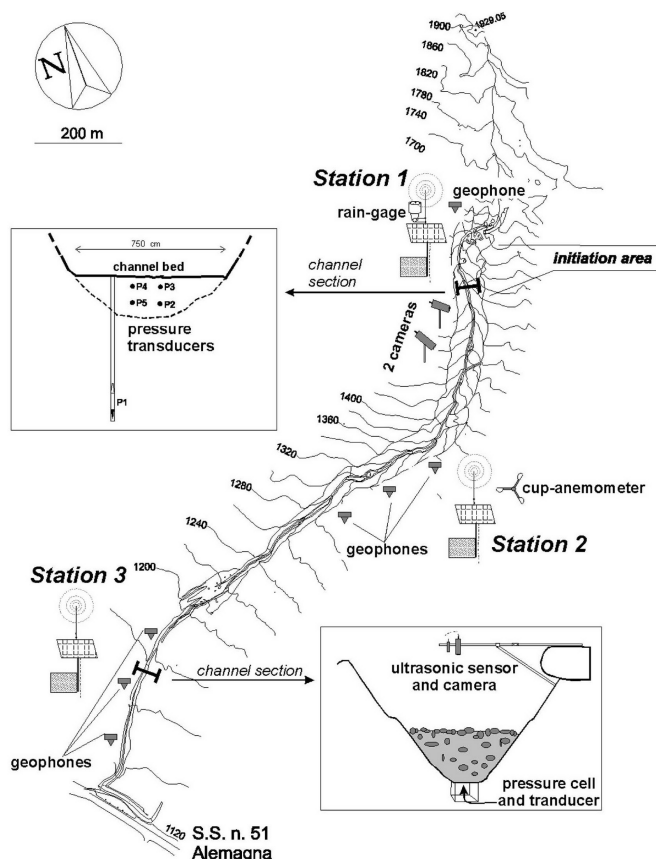


Figura 8.2: Il sistema di monitoraggio montato sul rio Acquabona nel 1997. Sono indicati la posizione delle 3 stazioni ed i sensori utilizzati (Arattano et alii, 1999).

I dati venivano immagazzinati ad una frequenza di 0.0033 Hz (un'acquisizione ogni 5 minuti) in condizioni normali, e ad una frequenza di 5 Hz in occasione di eventi. Il sistema

di monitoraggio è stato pensato in maniera da ottimizzare la velocità di acquisizione dati del collegamento radio, relativamente bassa, e considerando i limiti della potenza elettrica disponibile per l'attivazione della strumentazione. Al fine di ridurre il consumo di energia in assenza di eventi è stata adottata una modalità di attivazione completa del sistema di acquisizione solo nel caso di superamento della condizione di trigger.

8.2.2 Il secondo sistema di monitoraggio, 2000

Sviluppato nei primi anni 2000, in collaborazione con una compagnia locale per la gestione della strumentazione, era costituita anch'esso da 3 stazioni di misura (Galgaro, 2002) [1].

La configurazione era simile a quella adottata nel primo sistema di monitoraggio, sia per quanto riguarda gli strumenti utilizzati che per la acquisizione dei dati e il loro trasferimento (8.3).

La stazione più a valle era stata posta all'interno del bacino di ritenzione del materiale, poche decine di metri a monte rispetto alla strada statale Alemagna che collega Cortina d'Ampezzo con il fondovalle.

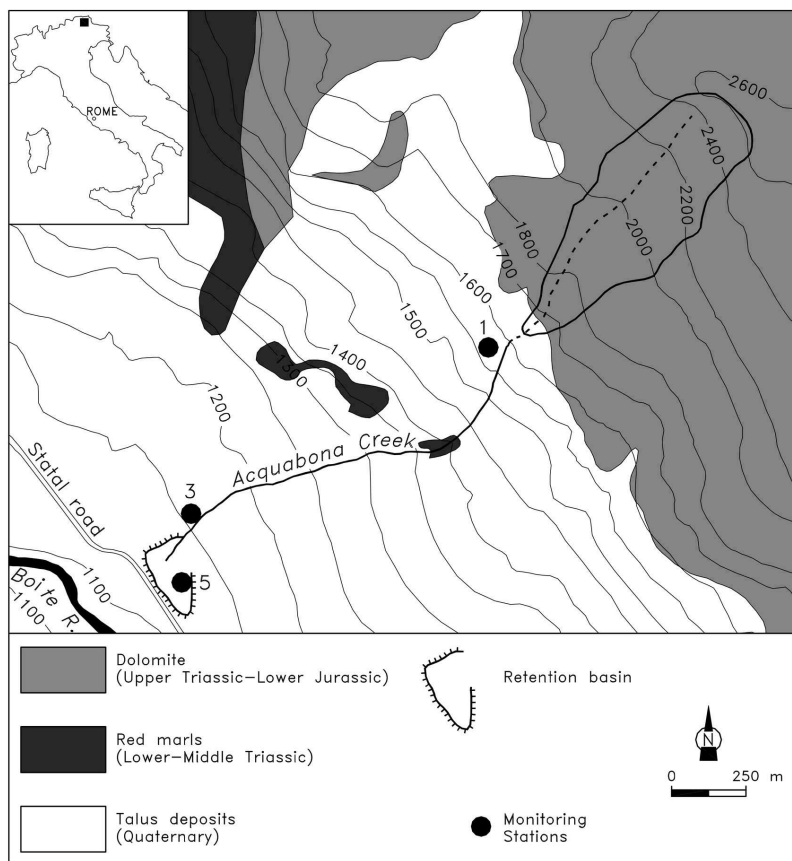


Figura 8.3: Il sistema di monitoraggio montato sul rio Acquabona nel 2000. È indicata la posizione delle 3 stazioni. La strumentazione e i principi di funzionamento sono quelli adottati nella precedente installazione (Tecca et alii, 2003).

8.3 L'ultimo sistema di monitoraggio, 2010

L'intenso evento di colata verificatosi nel luglio del 2009 ha provocato la distruzione di gran parte della strumentazione e ha reso necessaria una nuova progettazione del sistema di monitoraggio, che tenesse anche conto del modificato assetto dell'alveo.

La struttura del sistema di monitoraggio è stata semplificata rispetto alle versioni precedenti, con 2 stazioni installate.

I maggiori cambiamenti sono stati introdotti nel sistema di alimentazione e nella trasmissione dei dati garantendo migliori potenzialità sia in termini di velocità di trasmissione, sia in prospettiva di sviluppo futuro.

La stazione di monte è stata collocata in zona apicale rispetto al canale di scorrimento principale, a ridosso della parete rocciosa verticale, in posizione strategica sia dal punto di vista della sicurezza che dal punto di vista panoramica in prospettiva anche del posizionamento di una videocamera per la cattura della fase di innesco.

La quota è di 1715 m s.m.m.ed è maggiore rispetto alla quota di posizionamento delle stazioni di monte precedenti. Lo scopo è stato quello di ottenere una stima migliore delle precipitazioni della zona di alimentazione del canale.

Presso la stazione di monte è installata una stazione meteorologica Vaisala che fornisce informazioni di precipitazione, velocità orizzontale e direzione del vento, umidità e temperatura.

I dati provenienti dallo strumento vengono inviati attraverso un radio-modem al sistema d'acquisizione posto a valle, e gestiti localmente.

L'alimentazione viene assicurata da pannelli solari collegati ad una batteria che fornisce dai 12 V ai 14 V (Figura 8.4). Un regolatore di carica protegge la stazione dai picchi di tensione. La messa a terra della struttura di supporto è stata particolarmente curata.

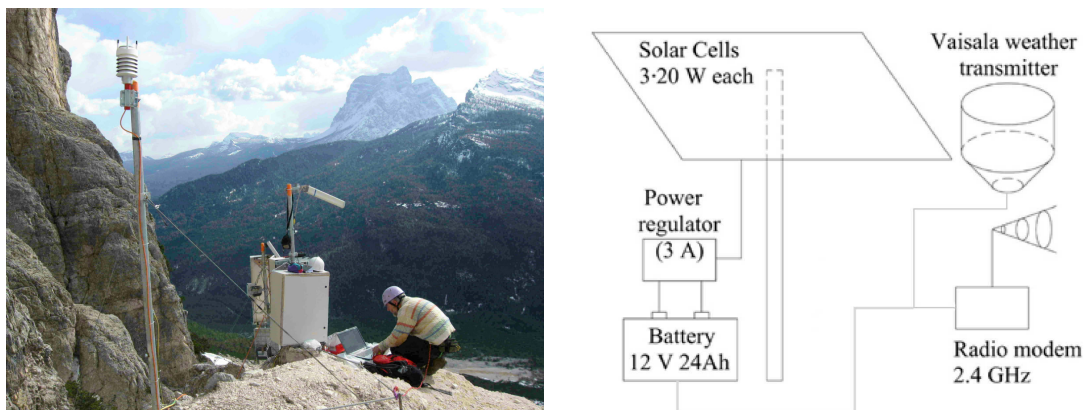


Figura 8.4: A sinistra, una immagine della stazione di monte del sistema di monitoraggio 2010 e, a destra, uno schema della strumentazione installata.

La stazione di valle è stata posizionata ad una quota di circa 1185 m s.m.m., ancorata ad un grande masso in sponda sinistra del canale.

La strumentazione è stata montata su un struttura di supporto reticolare in acciaio della lunghezza di 6 m, che si estende fino al centro del canale, ad un'altezza di circa 3 m dal fondo.

La struttura di supporto ruota attorno ad un asse verticale di ancoraggio, rendendo agevoli le operazioni di manutenzione e riducendo gli effetti di impatto di una eventuale colata estrema.

Sulla struttura sono montati un pluviometro a basculante, un distanziometro ad ultrasuoni, un distanziometro laser, una videocamera e un radio-modem per la ricezione dei dati provenienti dalla stazione di monte. L'alimentazione è assicurata dal collegamento alla rete elettrica principale (Figura 8.5).

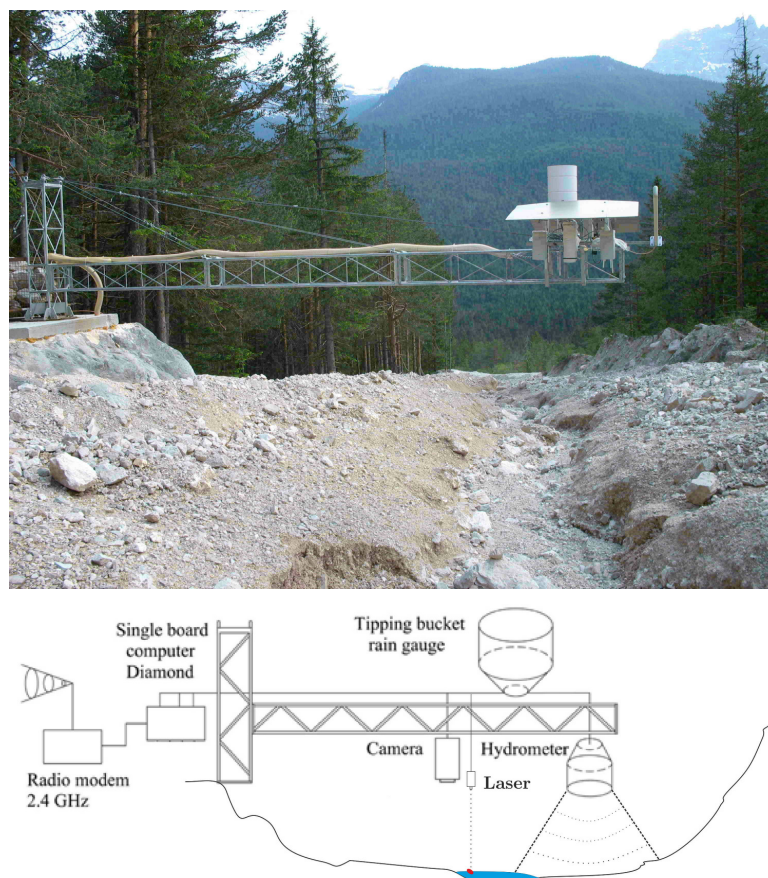


Figura 8.5: In alto, una immagine della stazione di valle del sistema di monitoraggio 2010 e, in basso, uno schema della strumentazione installata.

I dati provenienti da entrambe le stazioni vengono gestiti presso la stazione di valle da un acquirente della Diamond System, collegato ad un router, connesso alla rete *UMTS*, che consente la gestione dei dati dal Dipartimento di Geoscienze dell'Università di Padova.

La stazione meteorologica di monte

La stazione meteorologica di monte (modello Vaisala) misura il volume di precipitazione nel tempo mediante un sensore di rumore causato dall'impatto delle gocce d'acqua su una calotta metallica (Figura 8.6). Lo strumento fornisce i valori di precipitazione cumulata, precipitazione istantanea, il picco d'intensità e la durata dell'evento di pioggia.



Figura 8.6: Stazione meteorologica Vaisala.

Il sensore può operare in 4 diverse modalità:

- Precipitation Start End mode → il trasmettitore invia automaticamente un messaggio di precipitazione 10 s dopo la ricezione della prima goccia;
- Tipping bucket mode → simula il pluviometro. Il trasmettitore invia automaticamente un messaggio quando il contatore rileva un incremento unitario (0.1 mm; 0.01 in);
- Time mode → il trasmettitore invia automaticamente un messaggio di precipitazione nell'intervallo definito dall'utente;
- Polled mode → manda un messaggio di precipitazione nel momento in cui viene richiesto dall'utente.

Il pluviometro a basculante

La misura della precipitazione alla stazione di valle è eseguita con un pluviometro a bascula (Figura 8.7). L'area del recipiente è di 500 cm^2 . La basculata avviene ogni 20 g. di acqua che corrisponde a 0.20 mm di altezza di precipitazione. La frequenza d'acquisizione adottata è compresa tra 5 Hz e 10 Hz.

Il distanziometro ad ultrasuoni

Il distanziometro ad ultrasuoni (Figura 8.9), esegue una misura di distanza mediata su una superficie dipendente dall'angolo di apertura del segnale ultrasonico emesso. La distanza massima è pari a 15 m in perfette condizioni di superficie liscia e riflettente. In condizioni naturali di terreno irregolare scabro con quota variabile il raggio d'azione si riduce fino a 4 m. Lo strumento fornisce in output un valore in Volt, trasformato in misura di distanza mediante una curva di taratura realizzata sul posto. La taratura deve essere aggiornata periodicamente al fine di mantenere elevata la accuratezza della misura (Figura 8.8).



Figura 8.7: Pluviometro a basculante.

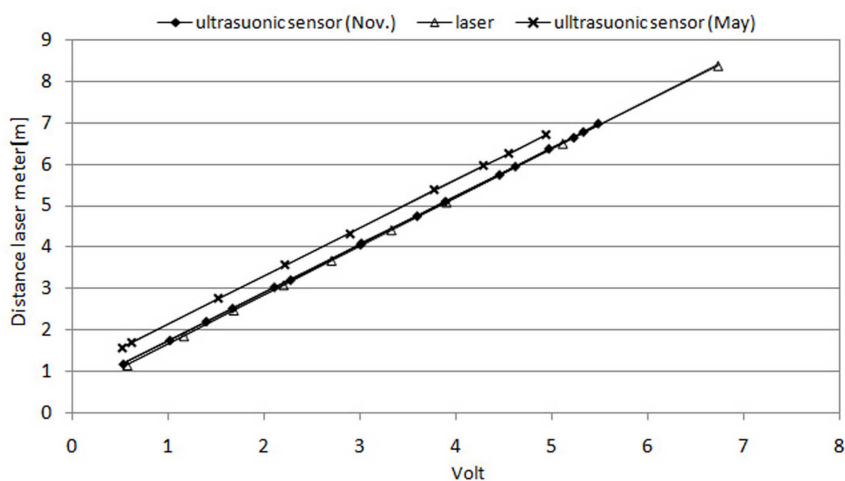


Figura 8.8: La taratura del distanziometro ad ultrasuoni e del distanziometro laser ad inizio e a fine stagione 2011. Il distanziometro ad ultrasuoni ha una curva di taratura traslata.

Il distanziometro laser

Il distanziometro laser viene alimentato ad una differenza di potenziale variabile tra 10 V e 30 V. La misura non viene effettuata (e viene fornito un segnale di errore) quando l'ambiente è fortemente illuminato o fortemente riflettivo in presenza di target a bassa riflettività. Il range di misura va da 0.1 m a 30 m in luce diffusa naturale e riflettente. La accuratezza della misura è di ± 2 mm, per superfici bianche, ± 3 mm, per superfici naturali, ± 5 mm alle temperature estreme. Sul campo lo strumento si è dimostrato adatto soprattutto in presenza di flusso in alveo e scarsa luminosità.



Figura 8.9: Sensori laser (colore nero) e ad ultrasuoni (colore blu).

8.4 Conclusioni

Il precedente sistema di monitoraggio, dopo aver subito numerose modifiche venne completamente distrutto in seguito ad un debris flow nel luglio del 2009. La progettazione della nuova stazione ha cercato di ottimizzare il posizionamento delle 2 stazioni in funzione della sicurezza da rischi troppo elevati di danneggiamento, e in funzione degli obiettivi per cui sono state create. Gli obiettivi sono principalmente quelli di caratterizzare la fase di innesco, di scorrimento e di deposito del debris flow facendo riferimento sia a strumentazioni metriche che a immagini derivanti da videocamera, affiancate a dati di pioggia per l'analisi del contesto idrologico dell'area. Sebbene l'attività sia annuale ci si scontra sovente con problematiche di manutenzione e di corretto funzionamento di tutto l'impianto che limitano le potenzialità ottime del sito di studio.

In linea generale, queste problematiche, associate a difficoltà di accesso dovute alla lontananza delle località, limitano il numero delle stazioni di monitoraggio convenienti e vantaggiose ai fini di ricerca. Alla complessità del fenomeno fisico, si sommano quindi altri fattori che limitano la possibilità di reperire dati con continuità.

Capitolo 9

L'attività del bacino di Acquabona: dati rilevati

9.1 Introduzione

L'attivazione del sistema di monitoraggio ha comportato un impegno costante nel tempo, sia per quanto riguarda gli aspetti pratici di configurazione del sistema, sia per quanto riguarda la fase di manutenzione della strumentistica e di tutte le componenti ad essa connessa. A tutto questo si aggiunge la fase di scaricamento e filtro dei dati, prima di passare all'elaborazione degli stessi ed alla loro interpretazione.

9.2 Il debris flow del 12 maggio 2012

Il primo evento di debris flow registrato presso il sito di monitoraggio di Acquabona, grazie al nuovo sistema predisposto nel 2010 e attivato nel 2011 risale a maggio 2012. I dati provenienti dalla videocamera non sono presenti a causa di un avaria del sistema di illuminazione notturna, che ha impedito la visione del passaggio della colata. I dati rilevati ed elaborati sono quindi forniti dai dati meteo della stazione di monte, dal laser, dal pluviometro e dal sensore ad ultrasuoni per quanto riguarda la stazione di valle. Dall'osservazione dei dati si possono trarre alcune informazioni molto interessanti. I dati di pioggia ad esempio, se confrontiamo le precipitazioni avvenute a monte e a valle delineano un marcata differenza in termini di mm precipitati al suolo: se infatti presso la stazione di monte sono stati registrati $47.35 mm$ di pioggia, presso la stazione di valle sono stati registrati solamente $8.4 mm$ di pioggia. Sono da escludere in questo caso interferenze dovute ad impurità che altre volte sono state trovate all'interno del pluviometro di valle, occludendo parzialmente il passaggio dell'acqua, che nel caso di precipitazioni moderatamente intense veniva quindi persa e non accumulata nella bascula (Figura 9.1). Il controllo della pulizia dello strumento è stata infatti verificata nella giornata antecedente al verificarsi dell'evento intenso di pioggia.

L'inserimento di una rete a maglie regolari all'interno della tramoggia e di una retina a maglie strette nell'imbutto sottostante ha permesso di ovviare al problema (Figura 9.2), o quantomeno di ridurre in modo deciso l'errore di misura dovuto alla perdita d'acqua.

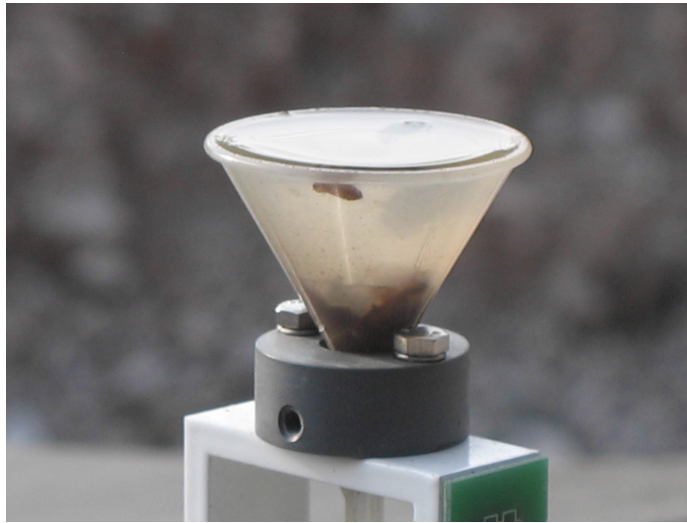


Figura 9.1: L'occlusione completa dell'imbuto attraverso il quale scorre l'acqua che produrrà poi le basculate è dovuta ad impurità provenienti dalla vegetazione arborea circostante oltre che da insetti.



Figura 9.2: Le retine a maglie inserite nei 2 punti critici dello strumento hanno la funzione di limitare fortemente l'occlusione dovuta ad impurità.

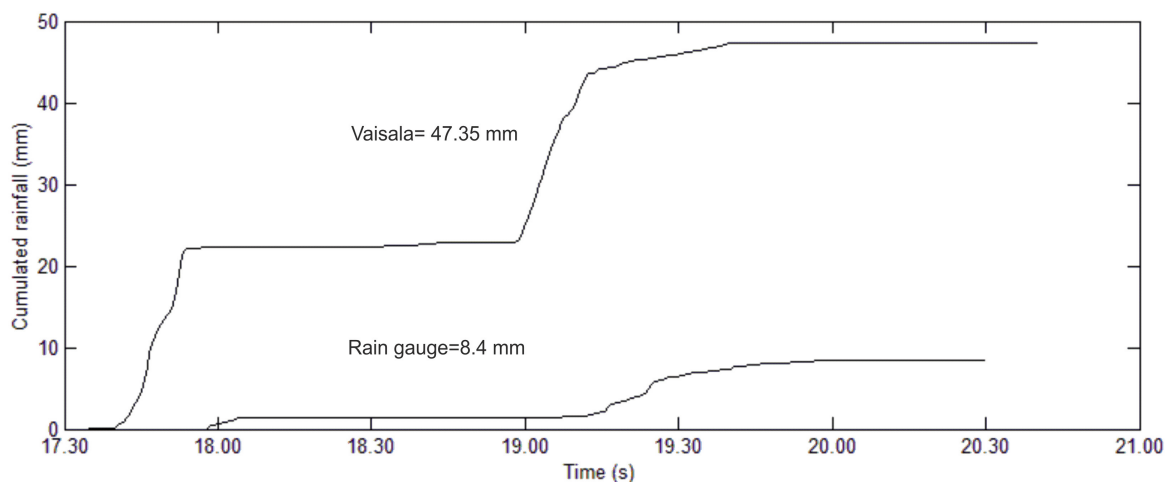


Figura 9.3: La pioggia cumulata totale registrata presso la stazione di monte è di 47.35 *mm*. La prima fase dell'evento perturbato ha una durata di 45' con un'intensità media oraria di 27.96 *mm/h* (0.466 *mm/min*). La seconda fase ha una durata di 37' con intensità media oraria di 34.15 *mm/h* (0.569 *mm/min*). Le piogge registrate a valle hanno prodotto un accumulo di 8.4 *mm*.

È stato comunque messo in luce un problema pratico e ricorrente in ambiente montano che può limitare l'utilizzo efficace di questo strumento. In prospettiva futura quindi, sulla base del budget economico a disposizione è comunque da preferire una stazione meteorologica della tipologia installata a monte che offre maggiori garanzie, essendo quest'ultimo un sistema di misura automatico e non meccanico.

Ritornando all'analisi pluviometrica che ha innescato l'evento, sembra evidente come l'influenza locale della pioggia sia determinante. Questa è dovuta soprattutto alla diversa quota delle 2 stazioni ed alla morfologia del versante che può rendere più o meno esposta la stazione di monte rispetto alla direzione di movimento del fronte di instabilità. Un'analisi pluviometrica completa degli eventi piovosi misurati, valutati a monte e a valle, sarà descritta in uno dei paragrafi successivi.

Il fronte perturbato ha prodotto 2 eventi molto intensi a distanza di 1 *h* e 15' l'uno rispetto all'altro nella zona di innesco, mentre presso la stazione di valle, sebbene siano riconoscibili i 2 eventi la quantità si riduce a 2 *mm* nel primo e a 6.4 *mm* nel secondo. Si nota inoltre dalla Figura 9.3 come in entrambi i casi il tempo di precipitazione sia traslato in avanti nel tempo a valle rispetto a monte. Il fatto che spesso si assista nelle zone montane ad un abbassamento lento e progressivo del fronte piovoso, specialmente in occasione di temporali, dalle zone a quota maggiore a zone a quota inferiore, fa ritenere questa risposta del bacino del tutto verosimile.

Se andiamo a confrontare il tempo di passaggio del fronte principale del debris flow nei pressi della stazione di valle rispetto alla collocazione nel tempo dei 2 eventi piovosi registrati a monte, si osserva come l'innesco sia con probabilità determinato dal secondo evento piovoso, il quale, sebbene sia caratterizzato da punte di intensità mediate nel minuto inferiori al primo evento, presenta un'intensità media oraria superiore. Il notevole ritardo del passaggio del fronte rispetto al termine della precipitazione (circa 1 *h* e 30' successivo alla cessazione della fase più intensa), fa supporre una velocità bassa di

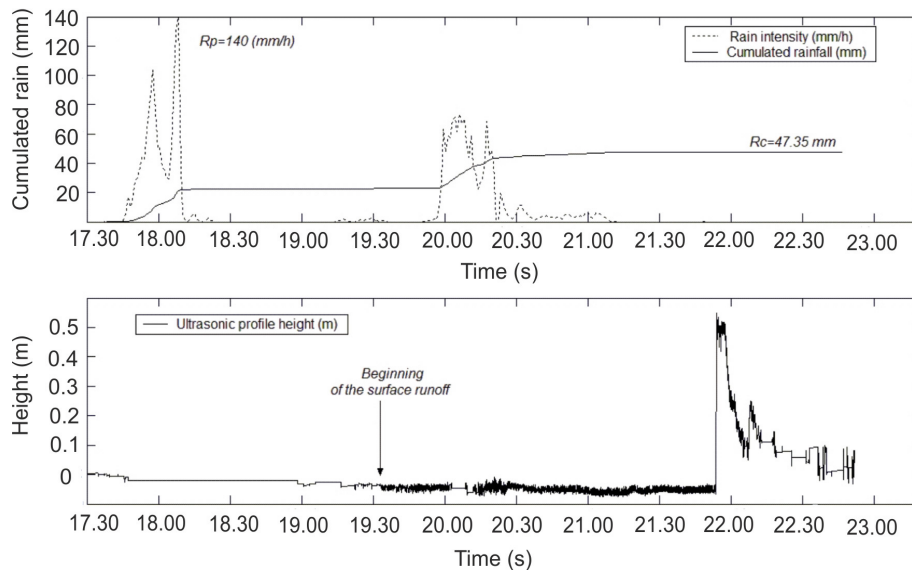


Figura 9.4: Nella figura in alto è illustrato l'andamento delle piogge elaborato dai dati della stazione meteorologica di monte. In basso, l'andamento della quota rispetto al fondo del canale fornita dal sensore ad ultrasuoni. Secondo la taratura adottata l'altezza massima raggiunta dal flusso nella fase iniziale è di 0.65 m.

avanzamento del debris flow (Figura 9.4).

Il sensore ad ultrasuoni, oltre a fornire informazioni metriche riguardanti l'evoluzione superficiale del debris flow, rileva anche il momento in cui inizia runoff superficiale di acqua sul fondo del canale, ovvero 1 h e 15' dopo il termine della prima fase piovosa. Infatti il sensore ad ultrasuoni rileva la distanza rispetto al fondo mediando la misura captata nel suo cono di influenza; al contrario il distanziometro laser può non essere così efficace in tal senso, essendo la sua misura relativa solamente ad un punto specifico del fondo del canale.

Un confronto tra le misurazioni effettuate con il laser e con il sensore ad ultrasuoni è visualizzata nei grafici di Figura 9.5. La quota massima raggiunta dal debris flow rispetto al fondo differisce di pochissimo, a favore del sensore ad ultrasuoni. Lo strumento ad ultrasuoni potrebbe essere infetto da piccoli errori dovuti a variazione della curva di taratura. Nel complesso l'andamento definito dai 2 strumenti coincide offrendo una misura affidabile e comparabile. Nel complesso l'andamento della curva per il distanziometro laser evidenzia una minore variabilità, a causa soprattutto della frequenza di acquisizione molto maggiore del sensore ad ultrasuoni.

Analizzando più nello specifico (Figura 9.6), si distinguono 2 impulsi distanziati di 10 circa l'uno dall'altro, il secondo dei quali dovrebbe essere riconducibile ad un flusso iperconcentrato.

I debris flow del 1997 e del 1998 furono innescati da piogge di breve durata ed alta intensità. I temporali furono simili in intensità (8 – 11 mm in 30' circa) e in durata, ma con differenti condizioni di precipitazione antecedenti. Le piogge che innescarono la colata del 17 agosto furono più intense, con 25 mm misurati in 30' presso la stazione di monte del sistema di monitoraggio allora installato. Questa precipitazione fu la più intensa registrata presso il sito di monitoraggio nei 2 anni, tuttavia il temporale registrato nel Giugno 1997 alla stazione Mt. Faloria ebbe un'intensità comparabile (22 mm in 30')

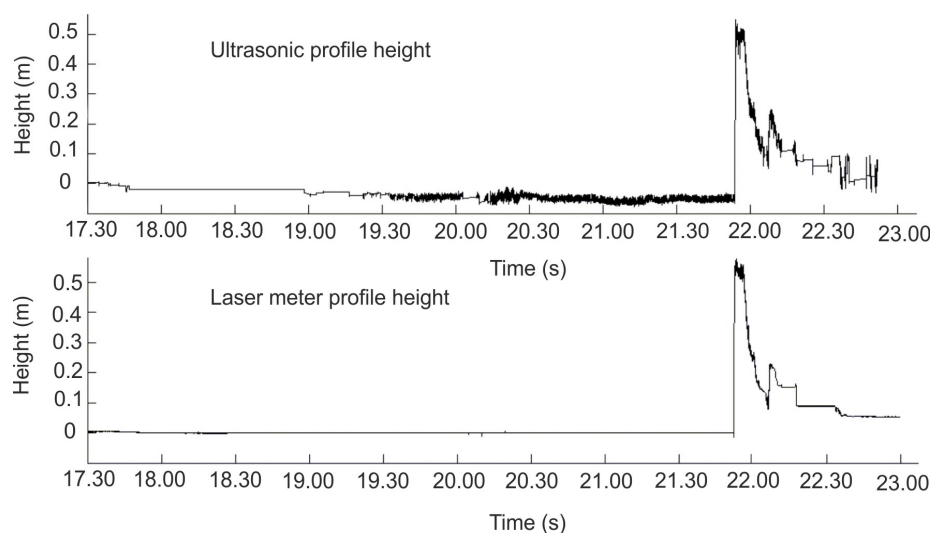


Figura 9.5: Le precipitazioni misurate in località Col de La Roa, quota 1100 m.s.l.m. presso San Vito di Cadore. La cumulata totale è di 40 mm. La stazione di misura di Cortina D'Ampezzo, 1230 m.s.l.m., evidenzia un accumulo di 33.8 mm.

(Berti et al., 1999). Le intensità di picco sui 10', furono di circa $6\text{ mm}/10'$ per il debris flow di luglio 1998, e circa $16\text{ mm}/10'$ per il debris flow di agosto 1998. La particolarità del debris flow registrato nel 2012 è proprio quella di presentare 2 eventi di pioggia intensi, tali da poter innescare teoricamente da soli una colata (Figura 9.7).

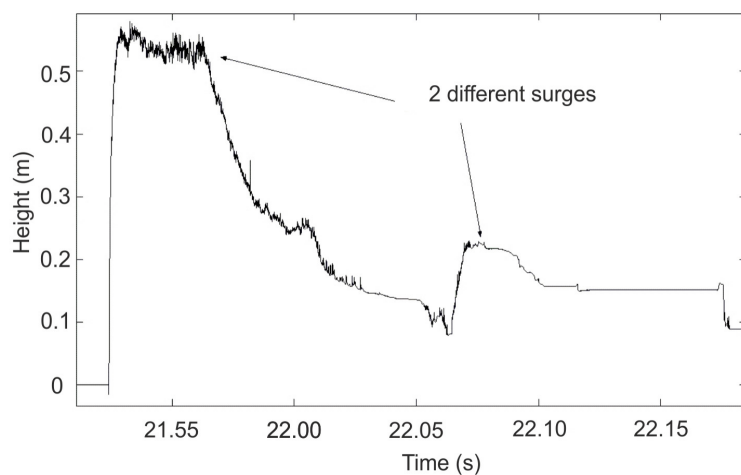


Figura 9.6: Andamento topografico puntuale di dettaglio del debris flow ottenuto con il distanziometro laser. Si notano 2 differenti impulsi.

9.3 Il debris flow del 21 luglio 2012

Numerose informazioni molto interessanti possono essere descritte grazie alla visione diretta di una colata detritica nel tratto che dalla stazione di valle porta sino al bacino

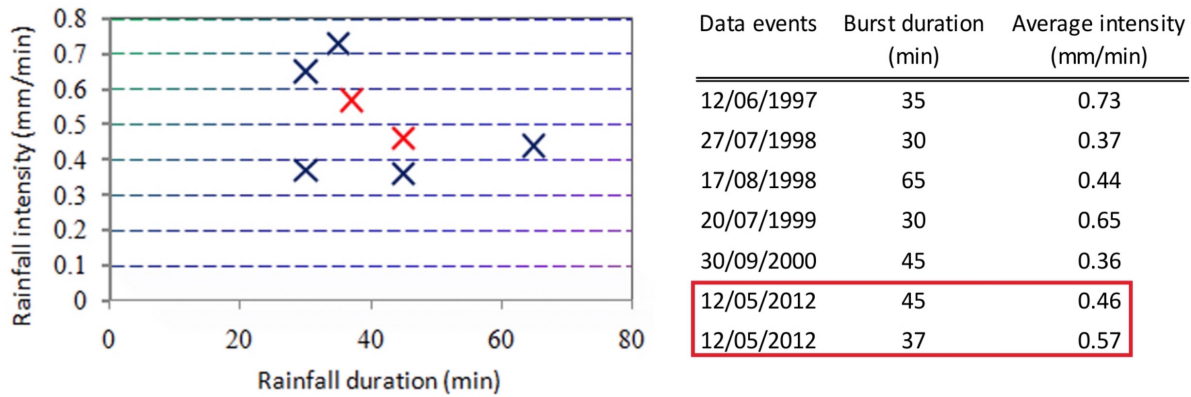


Figura 9.7: In rosso sono evidenziati i 2 eventi di pioggia che hanno innescato il debris flow del 12 maggio 2012.

di ritenzione (Figura 9.9), dove il materiale periodicamente viene raccolto e portato via. Il movimento è stato ripreso per poco più di 15' e considerando la lunghezza del tratto percorso si può affermare con sufficiente precisione una velocità media lungo il tratto di 0.49 m/s . Se estendiamo questa velocità a tutto il tratto con pendenza paragonabile, lunga 1 km circa, si può stimare un tempo di percorrenza di 30', il che spiegherebbe il passaggio del debris flow alla stazione di valle a precipitazione esaurita già da diversi minuti. La precipitazione designa 2 eventi ben distinti nel tempo, quantomeno nei pressi di San Vito di Cadore, dove i dati sono disponibili. L'evento più intenso si osserva nella tarda serata, a cavallo tra il giorno 20 e 21 di luglio, il secondo evento di grandezza inferiore nelle ore centrali della giornata del 21 luglio. Il passaggio presso la stazione di valle è avvenuto alle ore 13 : 45 (Figura 9.8).

Un'analogia con questa situazione si può evidenziare in un'altro evento che verrà descritto a breve, dove il passaggio del fronte è stato registrato più di $1h \text{ e } 30'$ dopo il termine dell'evento piovoso, a testimonianza della bassa velocità che caratterizza sovente il lungo tratto a bassa pendenza nella parte finale. Alcuni condizioni locali contribuiscono a formare delle contropendenze e dei piccoli bacini dove il materiale trova le condizioni per depositarsi, o comunque per rallentare ulteriormente e alzare il tempo di percorrenza. Se il materiale che costituisce il fondo del canale è in condizioni parzialmente sature, il debris flow con la sua azione erosiva può raccogliere e inglobare al suo interno nuovo materiale andando così ad incrementare nel tempo il suo volume. Nel debris flow del 21 luglio questo non è avvenuto, almeno per quanto riguarda il tratto osservato, a causa delle precipitazioni non elevate che probabilmente si sono prodotte nella zona di scorrimento del bacino. L'evento non ha quindi prodotto modifiche morfologiche sul fondo del canale, se non parzialmente nelle zone esterne, dove una parte consistente del materiale viene depositato, e non viene più rimosso negli istanti successivi. Al centro del canale invece, dove si concentra il flusso principale, il passaggio del debris flow lascia in questo evento scarsa traccia del suo passaggio nel senso che la parte liquida concentrata maggiormente nella parte posteriore tende ad effettuare un'opera di dilavamento e tende altresì a riportare alla luce la superficie topografica antecedente il passaggio. Il materiale granulare prima di essere depositato lateralmente tende ad essere spinto nella parte frontale, sia per quanto riguarda il fronte principale, sia per quanto riguarda i lobi laterali. Ciò significa che il gradiente di velocità è evidentemente in aumento verso la superficie del debris flow. Parte

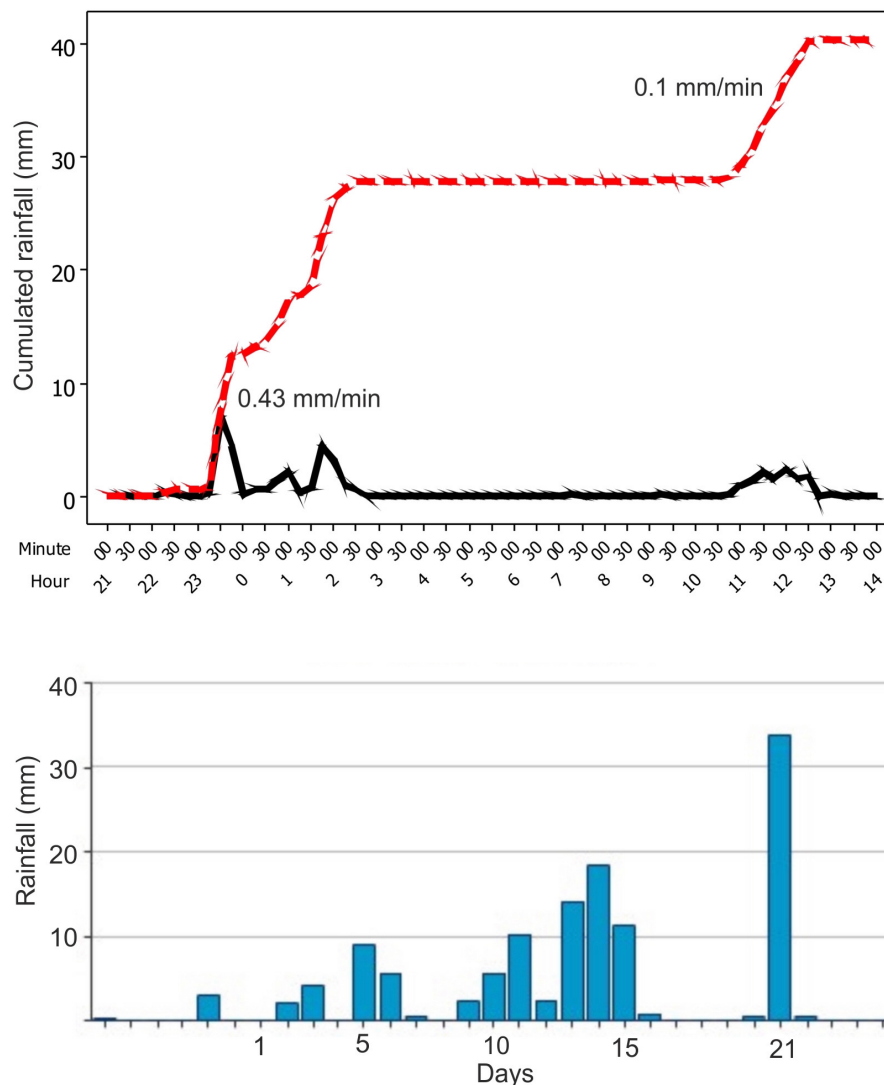


Figura 9.8: Le precipitazioni misurate in località Col de La Roa, quota 1100 m.s.l.m. presso San Vito di Cadore. La cumulata totale è di 40 mm. La stazione di misura di Cortina D'Ampezzo, 1230 m.s.l.m., evidenzia un accumulo di 33.8 mm.

del materiale tende poi ad essere spinto lateralmente, e si deposita non appena la spinta verso l'esterno che effettua il corridoio centrale in movimento non esaurisce la componente esterna di spinta. La parte granulare che scivola o meglio rotola sfruttando l'angolo d'attrito dinamico del fronte principale, viene successivamente inglobata nuovamente diventando componente attiva e entrando a far parte della dinamica complessa del flusso. Il fronte principale e i 2 cordoni esterni sono costantemente insaturi o parzialmente insaturi, il comportamento è per lo più di tipo granulare, con i massi di dimensioni maggiori che si concentrano proprio in queste zone, dopo un trasporto sulla superficie grazie alla spinta di galleggiamento operata dalla matrice fine.

Il comportamento del debris flow dal punto di vista reologico, evidenzia tutta la sua complessità nel tentativo di definire un comportamento reologico uniforme che risulta al contrario rapidamente variabile sia nello spazio che nel tempo. Il variare continuo delle condizioni al contorno produce infatti una modifica rapida della reologia del materiale.



Figura 9.9: Immagine del fronte incanalato del debris flow. L'altezza massima arriva ad 1.5 m dalla base del canale. Sul fondo il passaggio della parte centrale del flusso detritico sotto la stazione di valle del sistema di monitoraggio installato ad Acquabona.

Si dimostra qui come la riproduzione numerica di un fenomeno naturale come questo sia difficile da attuare, soprattutto per quanto riguarda tutte le fasi intermedie che escludono innesco e deposizione. Si capisce inoltre come i modelli numerici attualmente disponibili di debris flow siano ancora lontani da una simulazione verosimile del fenomeno e come un attento studio sul campo a livello di monitoraggio non sia sufficiente e debba affiancarsi ad uno studio di laboratorio per cercare quantomeno di avvicinarsi alla reale complessità del moto.

Alcune prove di laboratorio analizzate fotogrammetricamente, hanno evidenziato analogie con ciò che è stato visto sul campo, in particolar modo per quanto riguarda l'andamento della superficie libera ed il gradiente della stessa. Ad esempio, sia per quanto riguarda le prove incanalate che su pendio aperto il materiale zeolitico tende sempre a formare una concavità verso il basso, con una quota che va quindi a diminuire rispetto alla base della canaletta, spostandosi verso le 2 sponde esterne o comunque verso le zone esterne dell'ammasso in movimento. Allo stesso modo il materiale granulare grossolano, nei cambi di pendenza mostra una tendenza ad espandersi lateralmente, formando lobi laterali simmetrici rispetto al corridoio di scorrimento centrale (Figura 9.10).

Dall'analisi video delle immagini della videocamera posizionata sulla struttura di sostegno, si osserva come prima dell'arrivo del fronte, la portata torrentizia inizi a diminuire in modo sensibile 2'e 20 s prima della comparsa del fronte nella parte alta del campo di vista della videocamera (Figura 9.11) Dopo la movimentazione del materiale deposto sul fondo del canale, o comunque proveniente dalle sponde laterali, si viene infatti a creare un regime di flusso indipendente tra deflusso torrentizio e debris flow con velocità diverse. Una stima della posizione di partenza della colata sulla base di questa informazione risulta

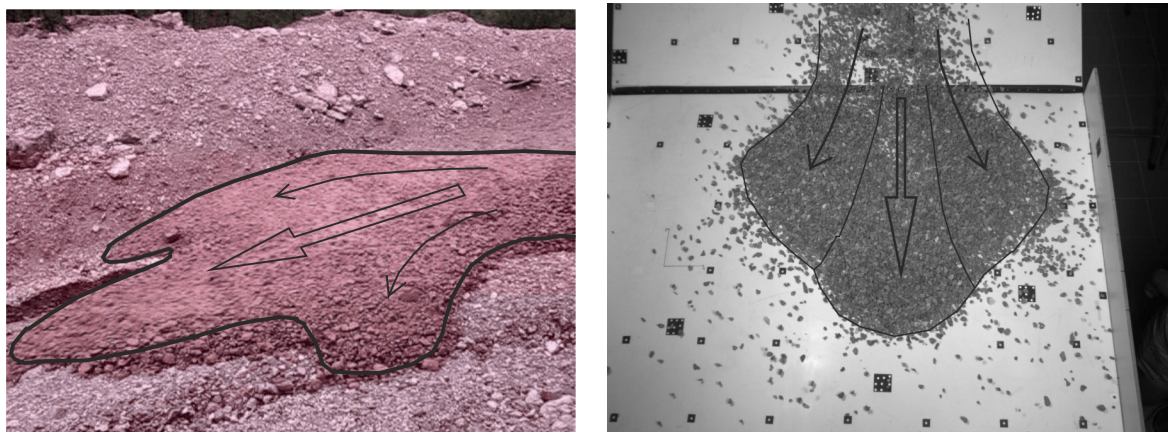


Figura 9.10: Raffronto molto interessante tra i comportamenti del materiale granulare grossolano in fase di deposito e una condizione simile sul campopresso la stazione di monitoraggio di Acquabona.

difficoltosa a causa delle complesse incognite che possono subentrare, quale ad esempio apporti di acque sub-superficiali che emergono localmente nel canale in seguito alla formazione di orizzonti sottili argillo-limosi, o il rilascio d'acqua alla base del fronte del debris flow.

La durata dell'evento è di 16' circa considerando anche impulsi di minor portata successivi al primo. La parte frontale del debris flow trasporta materiale a granulometria più elevata, è parzialmente insaturo ed è un flusso per lo più granulare. Il contenuto d'acqua aumenta nel tempo mentre le dimensioni medie dei massi trasportati diminuiscono. La coda della colata ha caratteristiche da flusso iperconcentrato con capacità erosiva evidente.

Se infatti si osserva attentamente il movimento di alcuni grani di riferimento si nota come nella prima fase, per lo più di scorrimento-depositazione, gli elementi subiscano uno spostamento con componente laterale verso l'esterno, andando a costituire una sorta di sponda mobile e vincolo al flusso incanalato. Nella seconda fase, per lo più di scorrimento-erosione si innesca un processo inverso nel quale l'opera di sostegno delle sponde esterne viene meno, e si produce la condizione per l'erosione al piede delle sponde e la tendenza evidente ad inglobare di nuovo materiale precedentemente depositato. Viene così parzialmente giustificata l'assenza di particolari segni del passaggio di debris flow a distanza di poche ore dall'evento, se non per la residua presenza di sponde laterali o lobi secondari. Le condizioni attritive che si generano nelle posizioni esterne marginali rispetto allo scorrimento macro-viscoso del canale di scorrimento centrale, dovute oltre che da un comportamento più granulare in condizioni parzialmente insature con poca presenza di matrice fine, anche all'attrito fornito dalle sponde mobili creatisi, generano una condizione simile a quelle creatisi in laboratorio nella zona di scorrimento incanalata (Figura 9.12).

9.4 Il debris flow del 31 agosto 2012

L'evento registrato in data 31 agosto 2012 denota delle particolarità rispetto agli altri eventi registrati. Il video disponibile attraverso la videocamera posta sulla struttura di sostegno e posta perpendicolarmente al braccio, o se vogliamo al canale di scorrimento, evidenzia un comportamento complesso da analizzare e da descrivere. Si nota infatti

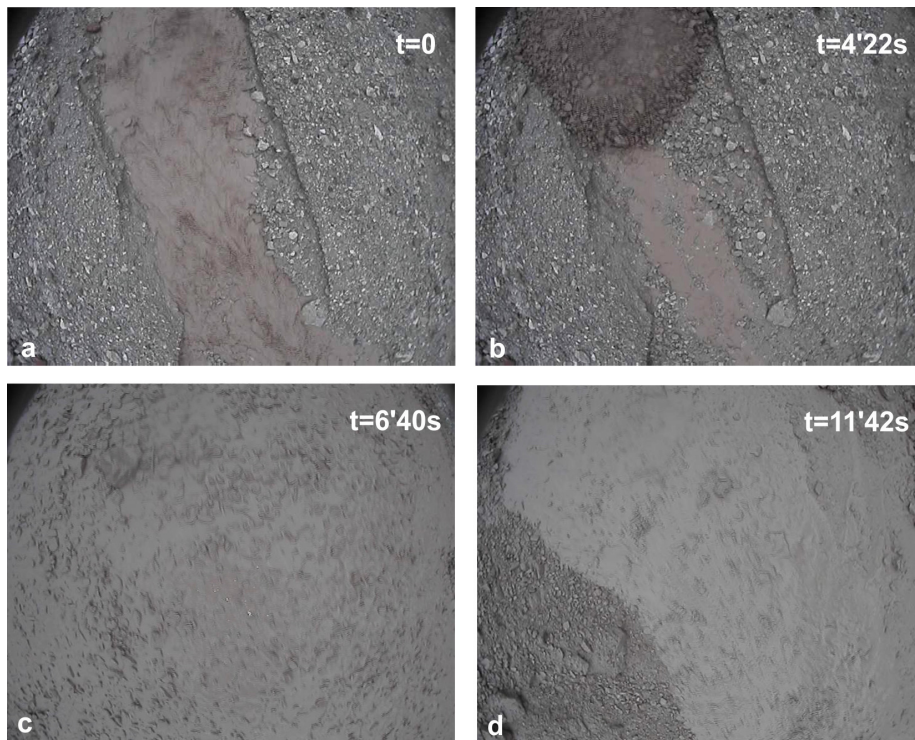


Figura 9.11: a): Condizioni di deflusso superficiale prima del passaggio del debris flow; b) fronte del debris flow; c) corpo centrale del debris flow con deposizione laterale; d) coda viscosa iperconcentrata erosiva delle sponde laterali.

una decisa alternanza nel tempo tra flusso turbolento di acqua da monte e apporto di materiale detritico. Inizialmente infatti si assiste ad un progressivo incremento della portata passante con una importante erosione delle sponde esterne preesistenti. Si assiste quindi ad una rapida evoluzione nel tempo della base del canale di scorrimento accentuata dal successivo passaggio da flusso idrico a flusso iperconcentrato. La Figura 9.13 mostra come il livello di base si sia alzato alla fine della fase più intensa dell'evento di circa 15 *cm* rispetto alla condizione pre-evento. Infatti, dalla sequenza video delle immagini, si notano degli impulsi brevi ma importanti di apporto di materiale con ampia distribuzione granulometrica, che si distribuisce uniformemente nel campo di presa della videocamera, andando a modificare nuovamente la base del canale con un andamento topografico più uniforme (Figura 9.14).

Il distanziometro laser è chiaramente un indicatore puntuale dell'evoluzione morfometrica del bacino, che però da solo, senza l'appoggio delle immagini fornite dalla videocamera non può riuscire a distinguere e separare il periodo di tempo in cui avviene l'apporto di materiale da quello in cui avviene soltanto passaggio di acqua più o meno concentrata.

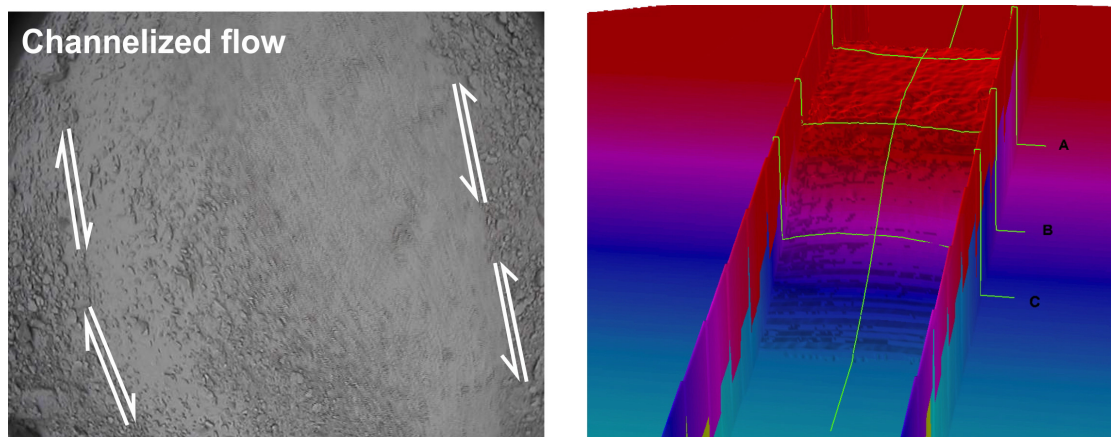


Figura 9.12: Nell'evento del luglio 2012 la colata si autocrea nel tempo le condizioni per un flusso incanalato. Esternamente rispetto al flusso principale è visibile la presenza più sensibile di materiale granulare di medio-piccola granulometria. In laboratorio, viene riproposta una simulazione di flusso granulare zeolitico in condizioni asciutte.

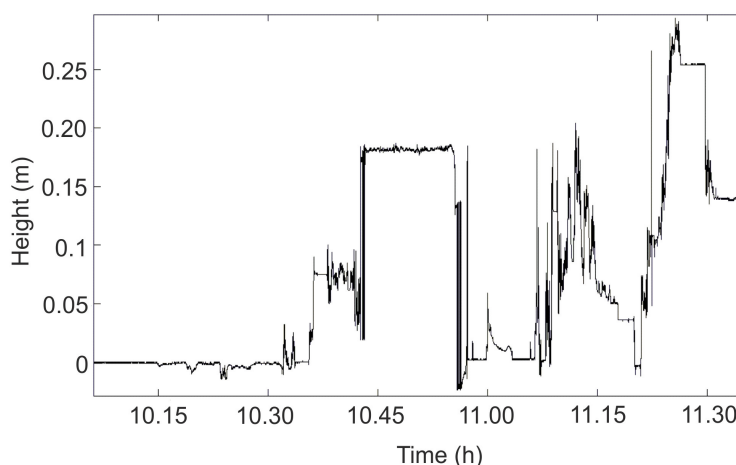


Figura 9.13: Evoluzione della quota del fondo, descritta dal distanziometro laser.

9.5 Analisi idrologica delle precipitazioni

Gli eventi piovosi raccolti nei mesi in cui la stazione di monitoraggio è rimasta attiva sono stati raccolti ed elaborati cercando di valutare risposta del bacino nelle 2 stazioni. Ricordo che la stazione di monte è equipaggiata con una stazione meteorologica vaisala, mentre a valle i dati di pioggia sono registrati attraverso l'utilizzo di un pluviometro a basculante. La distribuzione delle piogge mostra un'intensità complessiva relativa ad ogni singolo evento superiore nella zona di innesco, tranne alcuni isolati casi. Come precedentemente chiarito talune misurazioni possono essere affette da errore per quanto riguarda le precipitazioni registrate nella zona di valle. I grafici di Figura 9.15, sono stati ottenuti riordinando i dati secondo la durata di ciascun evento, lungo l'asse x , mentre lungo l'asse y viene riportata l'intensità massima relativa all'evento calcolata per diversi 'time steps' di 2', 5' 10' e 15' (Figura 9.16).

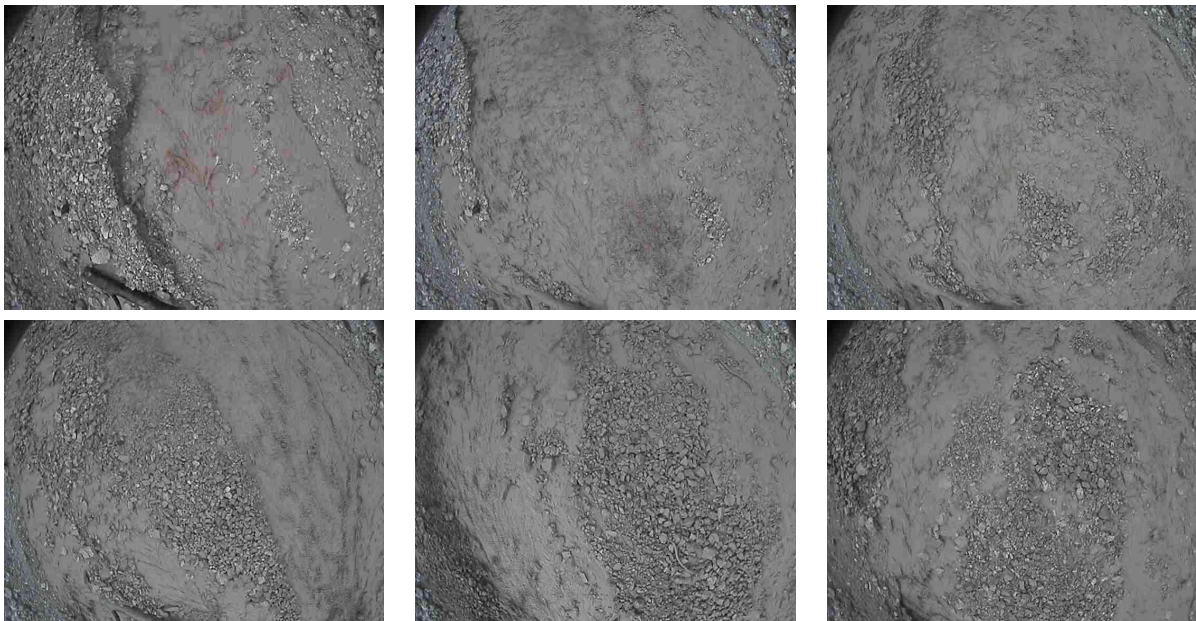


Figura 9.14: Campione di immagini riferite all'evento sopra descritto. L'evoluzione del fondo è rapidamente variabile nel tempo, e caratterizzato dall'insorgere di fenomeni di erosione e deposizione differenziali.

9.5.1 L'evento piovoso del 17-19 settembre 2011

Un'analisi completa, relativa ad un evento di pioggia di inizio autunno, di intensità relativamente bassa, ma di durata medio lunga, è stata completata al fine di determinare le diverse caratteristiche e proprietà di risposta a monte e a valle del canale da debris flow del bacino di Acquabona. In generale è possibile affermare dai dati in nostro possesso che le differenze del valore cumulato di pioggia a monte e a valle relative ad eventi tipicamente estivi possono essere molto evidenti; questo risulta invece meno evidente se andiamo a considerare eventi di pioggia prolungati dovuti a perturbazioni atmosferiche tipicamente autunnali prolungate nel tempo. L'esempio che viene mostrato in Figura 9.17, descrive l'andamento cumulato delle piogge accanto alle intensità di monte e valle, calcolate ad intervalli di 5'. Un'analisi di cross-correlazione per confrontare lo stesso evento sia a monte che a valle è stata effettuata nel paragrafo successivo. Il laser registra il deflusso superficiale per lo più idrico o limitato ad un modesto trasporto in sospensione (Figura 9.18).

La funzione cross-correlazione tra 2 funzioni continue $x(t)$ e $y(t)$ è definita come:

$$R_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)y(t + \tau)d\tau$$

Essa fornisce una misura della similitudine tra le 2 funzioni ed è funzione del ritardo o dell'anticipo τ tra i 2 segnali.

In corrispondenza del massimo della funzione di cross-correlazione si determina il tempo di ritardo, ovvero di quanto il picco si discosta dal lag pari a 0. Considerando poi che ad ogni lag corrisponde un determinato tempo di ritardo, nel nostro caso 5', si può facilmente risalire alla correlazione nella scala dei tempi tra le 2 funzioni (Figure.9.19). La

correlazione positiva esprime in questo caso un tempo di ritardo della funzione relativa all'intensità della pioggia a valle, rispetto a quella rilevata a monte, di 10' circa. L'evento si riferisce al mese di giugno, anno 2011, caratterizzato da una breve durata ed intensità medio bassa. Il valore della correlazione pari a 0.35.

9.6 Discussione e Conclusioni

Il sistema di monitoraggio installato ha come scopo quello di catturare dati di velocità e profondità del flusso, i quali, associati alle immagini video forniscono informazioni reologiche importanti per la comprensione di fenomeni complessi come i debris flow. La velocità di un debris flow, è funzione di variabili indipendenti come la pendenza del canale, la rugosità del letto, la profondità del flusso e la concentrazione del sedimento, essendo questa variabile responsabile della resistenza del flusso alla deformazione.

Dal momento che la pendenza del canale può essere considerata costante nella parte medio-bassa del canale ($7^\circ - 8^\circ$), e la rugosità responsabile dell'attrito sul fondo può essere considerata dello stesso ordine di grandezza, la velocità dovrebbe essere considerata in larga misura funzione della profondità del flusso e della concentrazione del sedimento. Tuttavia la variabilità a grande scala delle condizioni sopracitate può essere grande ed influire in maniera non trascurabile sul comportamento reologico del flusso o di parte di esso. Allo stesso modo, il passaggio del flusso stesso genera una modifica dei parametri e delle condizioni al contorno nel tempo e conseguentemente nella sua reologia. Per questo la velocità è variabile sia nel tempo che nello spazio in modo repentino e anche localizzato. La velocità è generalmente superiore nella coda diluita rispetto al fronte granulare. La velocità media del fronte del debris flow è significativamente più bassa della velocità istantanea superficiale. L'effetto frenante del fronte è dovuto alla resistenza attritiva superiore dovuta alla più alta concentrazione di materiale grossolano sul fronte stesso, come evidenziato dalle registrazioni video. La velocità superficiale appare largamente influenzata dalla concentrazione del sedimento. La distribuzione orizzontale delle velocità suggerisce che si verificano condizioni diverse di sforzo di taglio e viscosità all'interno dello stesso impulso detritico. Piccole variazioni d'acqua nella matrice granulo-argillosa può influenzare in modo drammatico la viscosità come mostrato in sperimentazioni di laboratorio (Coussot, 1997).

Sono necessarie sperimentazioni di laboratorio affidabili per comprendere meglio i processi che accompagnano l'evoluzione di un debris flow in territorio alpino – dolomitico, al fine di poter sviluppare e testare modelli reologici specifici. Lo scopo principale del lavoro di laboratorio intrapreso è proprio indirizzato in questa direzione, seppur limitato ad una condizione puramente granulare in questa fase (Genevois et al., 2000).

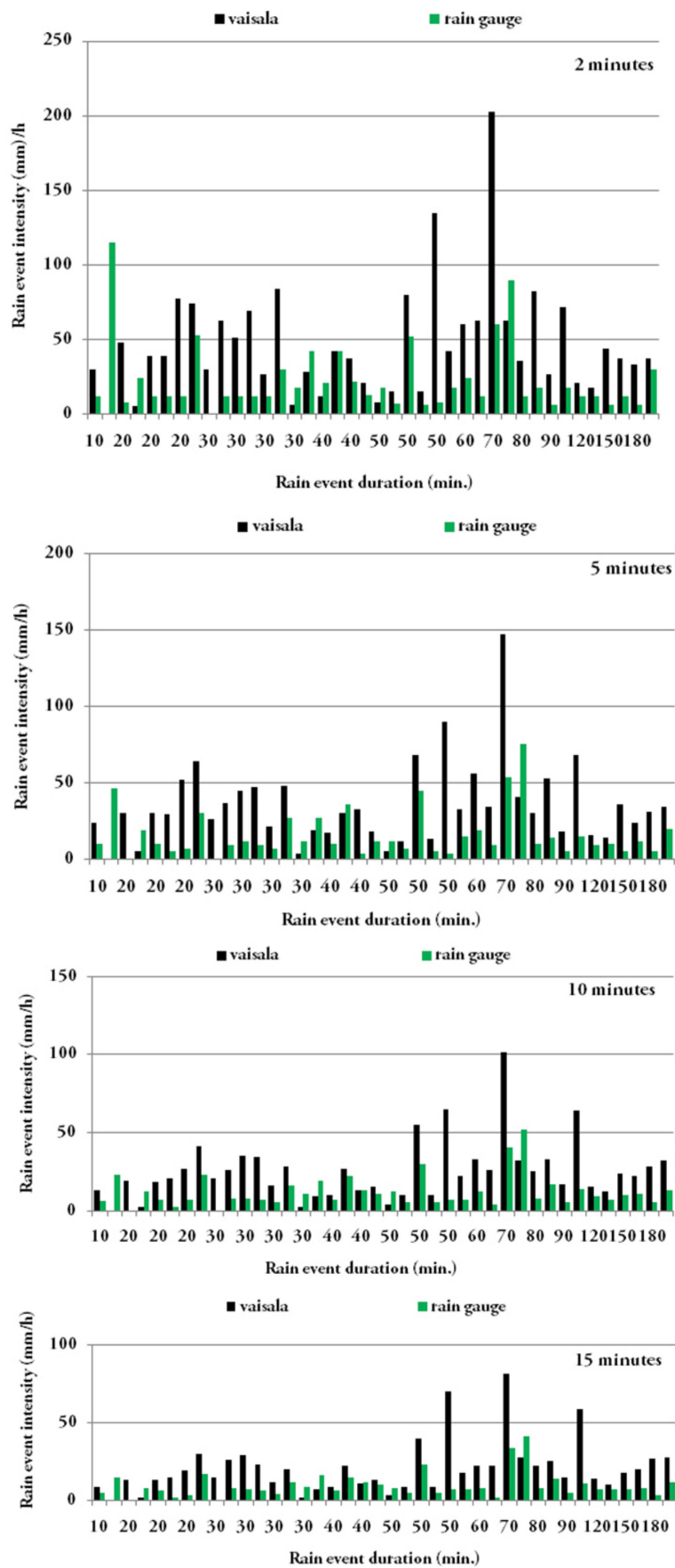


Figura 9.15: Intensità di precipitazione confrontate nelle 2 stazioni, secondo intervalli di calcolo crescenti.

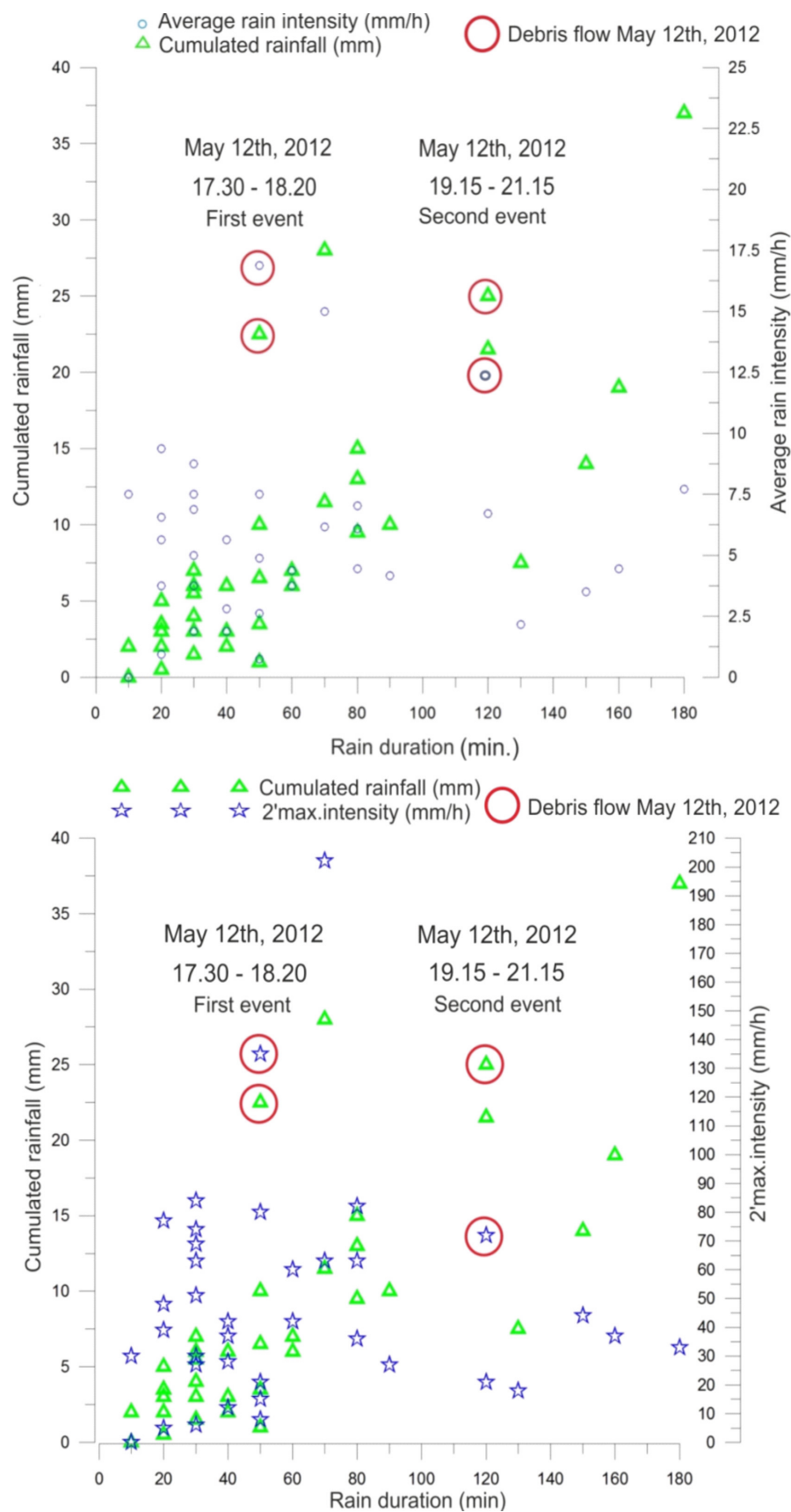


Figura 9.16: Relazioni che intercorrono tra durata, l'intensità e il valore cumulativo delle precipitazioni.

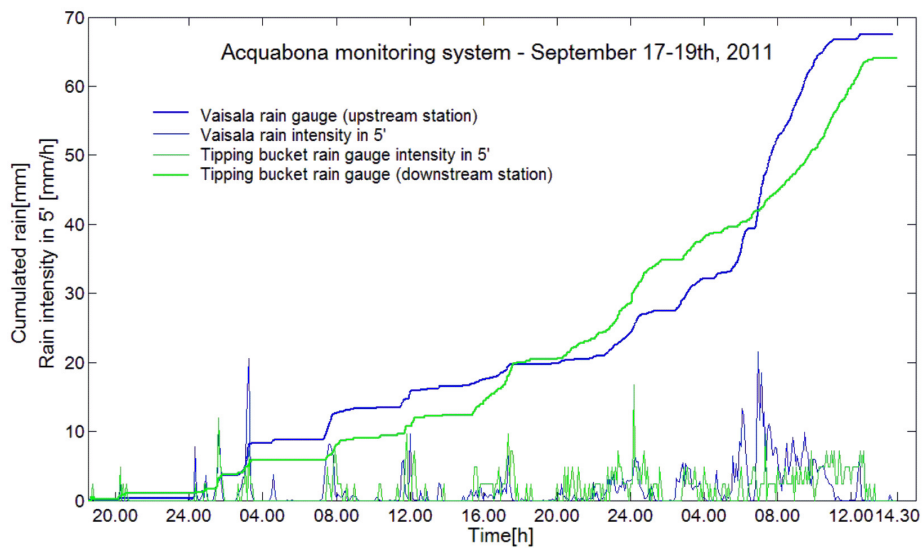


Figura 9.17: Proprieta di pioggia riferite all'evento. La perturbazione è caratterizzata da numerosi impulsi piovosi spalmati in 44 h complessive.

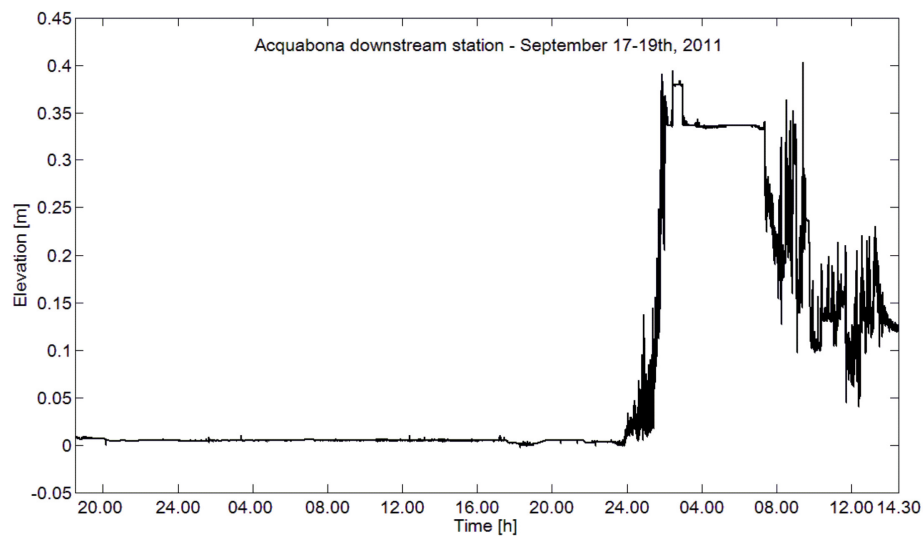


Figura 9.18: Profilo di quota relativo alla superficie liquida.

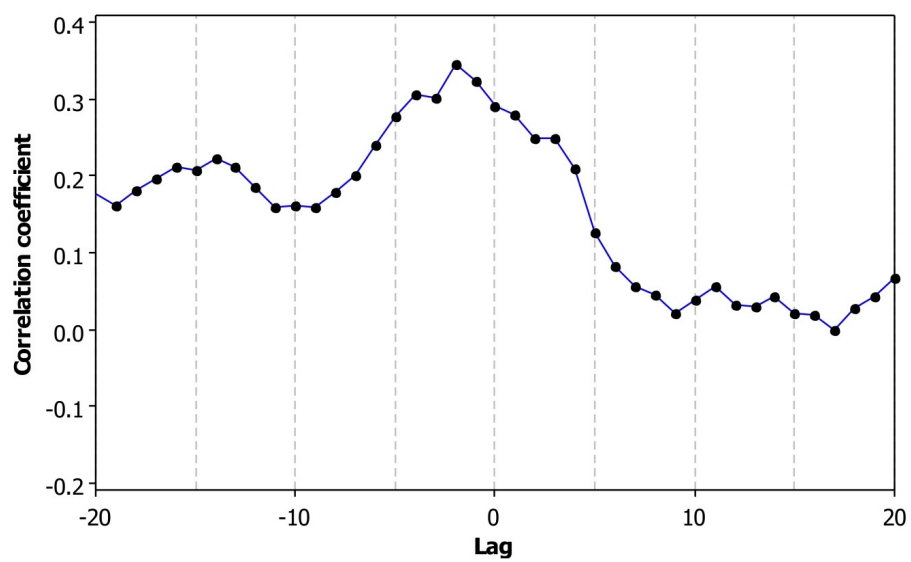


Figura 9.19: Analisi di cross-correlazione tra le intensità di pioggia nei 2 siti di misura.

Capitolo 10

Conclusioni

Presso il Laboratorio di Idrogeologia del Dipartimento di Geoscienze dell'Università degli Studi di Padova è stato progettato e realizzato un apparato sperimentale con lo scopo di descrivere tridimensionalmente, con tecniche fotogrammetriche, il movimento di un ammasso granulare in movimento sopra una canaletta sperimentale. Alla tecnica realizzata è stato attribuito il nome di Fotogrammetria Dinamica.

La tecnica è stata testata in diverse configurazioni sperimentali. Sono stati utilizzati materiali granulari diversi per forma e peso specifico, che presentano diverse proprietà reologiche, descritte in termini di angolo di attrito di natural declivio, angolo di attrito dinamico e 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 coni di rallentamento o deviatori di flusso.

Nei vari casi, la analisi fotogrammetrica è stata effettuata sulla base di otto fotogrammi rilevati alla frequenza massima di 20 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 3 Gb/s , mediante l'utilizzo di otto hard-disk gestiti con metodologia Raid0 (vedi cap.3).

Le elaborazioni fotogrammetriche sono state eseguite mediante l'utilizzo di due diversi software commerciali complementari tra loro: l'uno, 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 (Tie Points), più adatto alla elaborazione delle fasi della

dinamica del moto (par.2.7).

I rilievi sperimentali e le successive elaborazioni sono stati oggetto di approfondite analisi volte a stabilire la loro qualità metrica (vedi cap.6). Si può concludere che:

- l'apparato sperimentale progettato si è dimostrato adatto a fornire fotogrammi di qualità sufficiente per l'analisi fotogrammetrica;
- la precisione della ricostruzione tridimensionale aumenta all'aumentare dei Tie Points riconosciuti e dell'accuratezza nel posizionamento dei Control Points;
- al diminuire del numero di fotogrammi sovrapposti, assume maggiore importanza il posizionamento manuale dei Control Points;
- generalmente il software Agisoft-Photoscan tende a sovrastimare lievemente la quota topografica media reale;
- il grado di automatizzazione raggiunto è da ritenersi buono ma non ancora ideale. Lo stato dell'arte riguardante la ricerca nel settore fotogrammetrico non consente, al momento, di costruire una catena automatica esaustiva e soprattutto un controllo completo dell'operatore sui parametri statistici di accuratezza della restituzione. Si è quindi proceduto, con il software *Australis*, all'individuazione dei control points (GCP), alla definizione della scala e del sistema di riferimento, nonché all'utilizzo di tutti i Control Points per la restituzione tridimensionale della base del sistema fisico, delle sponde laterali e degli elementi di controllo del flusso (coni rallentatori e deviatori di flusso). Queste fasi hanno un elevato grado di controllo manuale e tempi abbastanza lunghi di applicazione. La fase successiva di elaborazione tridimensionale dell'ammasso in movimento, invece, presenta un alto grado di automatizzazione (individuazione automatica di un numero elevato di punti), ma un controllo inferiore sui parametri statistici riferiti al bundle adjustment. I tempi di elaborazione sono significativamente maggiori nel caso si renda necessario, per minimizzare gli errori sia nello spazio immagine che nello spazio oggetto, inserire in ogni immagine un elevato numero di Control Points.

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, per esempio mediante tecnologie GIS (vedi par.4.5), di tracciare sezioni trasversali e longitudinali dell'ammasso nell'istante di tempo considerato. 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. Ancora, l'interazione con le opere di controllo (coni di rallentamento o deviatori di flusso) viene descritta mettendo in evidenza i dettagli in termini metrici. Velocità, accelerazioni e altri parametri reologici (per esempio angoli di attrito dinamici e statici) sono ulteriori possibili prodotti delle elaborazioni (vedi par.5.3, 5.4, 5.5, 5.6).

L'attività di laboratorio è stata legata fortemente all'attività di campo, da una parte con il fine di portare sul campo le tecniche sviluppate in laboratorio, dall'altra con lo scopo di prendere consapevolezza sulle manifestazioni reali dei fenomeni studiati e di definire gli elementi di similitudine tra i fenomeni reali e i fenomeni riprodotti a piccola scala in laboratorio.

L'attività di campo è stata sviluppata presso il sito da colate di detriti di Acquabona, nelle Alpi bellunesi, allo scopo di dare continuità ad un impegno iniziato alla fine degli anni '90 e continuato, a fasi alterne, fino al 2010.

Nel 2011 è stato progettato e messo in funzione un nuovo sistema di monitoraggio, composto da una stazione meteorologica di monte, per il monitoraggio dei parametri pluviometrici associati all'innescò delle colate, e una stazione di valle, nella zona di scorrimento prossima alla zona di arresto, per la descrizione delle proprietà dinamiche delle colate (vedi cap.8).

Il sistema di monitoraggio, concepito in questa fase per dare affidabilità nel rilevamento dei dati, ha permesso di mettere in evidenza la criticità nella discriminazione dei dati di pioggia che innescano le colate detritiche, dovuta al carattere locale delle precipitazioni: il confronto tra le misure di pioggia effettuate in quota e quelle effettuate a valle ha mostrato notevoli differenze. Sono stati registrati alcuni eventi di colata, presso la stazione di valle, che hanno messo in evidenza proprietà riconoscibili anche nelle prove sperimentali eseguite in laboratorio, ciò nonostante il loro carattere trifasico (vedi cap.9).

L'esperienza acquisita in laboratorio e sul campo porta a ritenere ragionevole il trasferimento delle tecniche fotogrammetriche sul campo. Tre videocamere si ritengono sufficienti a garantire una buona restituzione della evoluzione tridimensionale della superficie del debris flow, in condizioni di illuminazione (parametro critico) sufficienti a mantenere bassi i tempi di esposizione.

Si ritiene, infine, che l'attività effettuata sia in laboratorio che sul campo, rivesta particolare importanza per il potenziale utilizzo ai fini della taratura dei modelli fisico-matematico-numericì concepiti per descrivere la notevole complessità dei fenomeni studiati.

Bibliografia

- [1] **A., G.** 2002. *Studio Sperimentale Delle Colate Detritiche Rapide Mediante Sistemi Di Monitoraggio: Il Bacino Di Acquabona*. PhD thesis Università degli Studi di Ferrara. 140 pp. (in italian).
- [2] **A., G. R. P. M. S.** 2000a. p. 283 – 292. *In: Wieczorek G. F. and Naeser N. D. (2000, Eds.) . Proc. 2th Int. DFHM Conference, Taipei, Taiwan,.*
- [3] **A., P. M. L.** 1999. Contract No. ENV4-CT96-0253 2 European Omission (1999, ed.) - Debris flow risk. Final Scientific Report, EC Research Programme - Environment and Climate 1994-1998 Brussels. 20 pp.
- [4] **A., S.** 1998. *Innesco e Mobilitazione Di Debris Flow. Il Bacino Sperimentale Di Acquabona (Cortina D'Ampezzo, BL)*. PhD thesis Università degli studi di Bologna - Università degli studi di Modena. 162 pp. (in italian).
- [5] **A., S., and Berti M..** 2005. p. 185 – 196. *In: Proc. Int. Symposium Landslide Hazards in Orogenic Zones, Katmandu, Nepal . Symposium Landslide Hazards in Orogenic Zone, Katmandu, Nepal,.*
- [6] **Acute3D** 2011. <http://www.acute3d.com/smart3dcapture>.
- [7] **A.M., A. M. T. P. D., and Genevois R..** 2007. *In: Chen C. and Major J.J. . Proc. 4th Int. DFHM Conference, Chengdu, China,.*
- [8] **Australia, P.** 2011. *User Manual for Australis*.
- [9] **Autodesk** 2011. <http://www.123dapp.com/catch>.
- [10] **Basler** 2013. *BAS1309 ace Brochure web*. Basler AG.
- [11] **Berti, M., and A Simoni.** 2003. p. 11 – 13. *In: Proceedings of International Conference on Fast Slope Movements-Prediction and Prevention for Risk Mitigation, ICFSM2003, Naples . International Conference on Fast Slope Movements-Prediction and Prevention for Risk Mitigation,.*
- [12] **Berti M., Genevois R., S. A. e. P.** 1999. *Geomorfology* **29**:265 – 274.
- [13] **Broers, H., and N. Jansing.** 2007. *International Orthopaedics* **31** (1):39–42.
- [14] **C., G. R. T. P. F. M. S., and D'Alpaos A..** 2009. p. 291 – 296. *In: Malet J-P., Remaitre A. and Bogaard T. . Proc. Conference Landslide Processes: from Geomorphological Mapping to Dynamic Modelling. A Tribute to Dr. Theo Van Asch, Strasbourg France,.*

- [15] **D'Accordi** 1999. Master's thesis Universita degli Studi di Trento.
- [16] **De Toni, Scotton, B.** 2004. *Modello matematico e numerico bidimensionale per lo studio delle valanghe di neve densa*. Università di Trento. Dipartimento di ingegneria civile e ambientale.
- [17] **Deganutti A. M., Tecca P.R., G. R., and Galgaro A.** 2003. p. 833 – 841. *In: Rickenmann D. and Chen C.-I. (2003, Eds.) . Proc. 3rd Int. DFHM Conference, Davos Switzerland,.*
- [18] **Fraser, C., and Fabio Remondino.** 2006. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **XXXVI** (5):266-272.
- [19] **G., G. C. D. F.** 2008. Hydrological processes **22**:2248 – 2263.
- [20] **Galgaro A., Tecca P.R., G. R. D. A.** 2005. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. **5** (2):211 – 215.
- [21] **Genevois R., Tecca P.R., B. M. S. A.** 2000b. p. 615 – 620. *In: Bromhead E., Dixon N. and Ibsen M.L. (2000, Eds.) vol. 2. Proc. 8th Symposium on Landslides, Cardiff England,.*
- [22] **Genevois R., Tecca P.R., B. M. S. A.** 2000c. p. 283 – 291. *In: Wieczorek G.F. and Naeser N.D. (2000, Eds.) . Proc. 2th Int. DFHM Conference, Taipei, Taiwan.,.*
- [23] **Geosystems, L.** 2005. *Leica Photogrammetry Suite Project Manager*. Geospatial Imaging LCC Norcross,GA30092-2500 USA.
- [24] **Inc., E. S.** 2008. <http://www.photomodeler.com/products/pm-scanner.htm>.
- [25] **Koutsoudis, A., Blađ Vidmar, George Ioannakis, Fotis Arnaoutoglou, George Pavlidis, and Christodoulos Chamzas.** 2013. Journal of Cultural Heritage .
- [26] **Luhmann, T.** 2010. {ISPRS} Journal of Photogrammetry and Remote Sensing **65** (6):558 – 569. ISPRS Centenary Celebration Issue.
- [27] **Luhmann, T., Stuart Robson, Stephen Kyle, and Ian Harley.** 2006. *Close range photogrammetry: Principles, methods and applications*. Whittles.
- [28] **M., F. L. P.** 2000. J. Phys. Chem. Earth **25** (9):757 – 763.
- [29] **M.C., A.** 2007. *Le Colate Detritiche Della Conca Ampezzana*. PhD thesis Università degli Studi di Padova. 99 pp.
- [30] **of Civil Engineers U.S. Army Corps of Engineers Staff, A. S.** 1996. *Photogrammetric Mapping*. Asce Publications. Estratto da: <http://books.google.it/books>.
- [31] **Photosynth, M.** 2011.
- [32] **P.R.Wolf** 1983. *Elements of Photogrammetry*. McGraw-Hill,Inc., NewYork.

- [33] **R., A. M. G., and Tecca P.R.** 2008. Landslides **5**:143 – 150.
- [34] **Remondino, F., and Clive Fraser.** 2006. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences **36** (5):266–272.
- [35] **Robertson, D., and R. Cipolla.** 2009. *Structure from Motion*. Practical Image Processing and Computer Vision, John Wiley.
- [36] **R.Szeliski, S. B. J. D.** 2006. p. 519–528. In: IEEE Computer Vision and Pattern Recognition Conference vol. 1. Computer Vision and Pattern Recognition, 2006 IEEE Computer Society Conference, Washington DC.
- [37] **S.D’Amelio, M. B.** 2007. Technical report Dipartimento di Rappresentazione, Università di Palermo Viale delle Scienze, 90128 Palermo.
- [38] **Selvini, A.** 1994. *Elementi di fotogrammetria*. CittàStudi.
- [39] **Stephen Kyle Karl Kraus, I. H.** 2007. *Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans*. 2nd ed. Walter de Gruyter. Estratto da: <http://books.google.it/books>.
- [40] **Tecca P.R., Galgaro A., G. R. D. A. M.** 2003. Hydrological processes **17**:1771 – 1784.
- [41] **Technologies, V.** 2011. <http://www.hypr3d.com>.
- [42] **T.Schenk** 2005. Technical report Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science. schenk.2@osu.edu.
- [43] **Vettorazzi, M.** 2004-2005. *Rilievo Fotogrammetrico Da Terra Di Trattati di Corsi D’acqua a Forte Pendenza*. PhD thesis Università degli Studi di Trento.
- [44] **W.Neubauer, M. G. M. C. M.** 2011. In: From Deposit to Point Cloud . 23rd International CIPA Symposium, Prague, Czech Republic.