



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN
GEOLOGIA E GEOLOGIA TECNICA

TESI DI LAUREA

**RILIEVO FOTOGRAMMETRICO DINAMICO DI
AMMASSI GRANULARI
-
INDAGINE SPERIMENTALE**

Relatore: Prof. Ing. Paolo Scotton

Correlatore: Dott. Daniele Dallavalle

Laureanda: Valentina Boccanegra

ANNO ACCADEMICO: 2011/2012

Tesi di Valentina

Valentina Boccanegra

04 04 2012

Indice

1	Introduzione	7
2	Tecniche Fotogrammetriche	1
2.0.1	Introduzione	1
2.1	Ottica Geometrica	1
2.1.1	Le lenti	2
2.1.2	Come costruire l'immagine	5
2.1.3	Tipi di lenti	5
2.2	Teoria Fotogrammetrica	7
2.3	Fasi del processo fotogrammetrico	8
2.3.1	Presa fotogrammetrica	8
2.3.2	Punti d'appoggio topografici	10
2.3.3	Restituzione	10
2.4	Condizioni di collinearità	11
2.5	La rotazione spaziale	12
2.6	Orientamento Interno	14
2.6.1	Abberazioni delle lenti	16
2.6.2	Certificato di calibrazione	16
2.7	Orientamento esterno	17
2.7.1	Orientamento esterno di un singolo fotogramma (space resection)	17
2.7.2	Orientamento combinato di una coppia di immagini	19
2.8	Bundle Block Adjustment	22
2.8.1	Least square adjustment (metodo ai minimi quadrati)	24
2.9	Calibrazione di camere digitali non metriche (self-calibration)	25
2.9.1	Ottimizzazione del self-calibration bundle adjustment	25
2.9.2	I parametri addizionali (AP)	26
2.10	Tipi di Fotogrammetria	27
2.10.1	Fotogrammetria aerea	28
2.10.2	Fotogrammetria terrestre	31
3	Calibrazione delle ottiche utilizzate	33
3.1	L'apparato sperimentale	33
3.1.1	L'apparato sperimentale	33
3.1.2	L'ammasso granulare	33
3.1.3	Il computer	40
3.2	Le videocamere	42
3.2.1	Le videocamere digitali	42
3.2.2	Le videocamere Ace GigE Basler	44
3.2.3	Specifiche generali	44
3.2.4	Sincronizzazione delle camere	47
3.2.5	Le ottiche	47
3.2.6	Calibrazione	49

4	Applicazioni di laboratorio	61
4.1	Prove statiche	61
4.1.1	La fase di presa	61
4.1.2	Fase di orientamento	61
4.1.3	Sviluppo fotogrammetrico con Leica Photogrammetry Suite	63
4.1.4	Il programma AgiSoft PhotoScan Professional Edition	66
4.1.5	Elaborazione del modello 3D attraverso l'uso di ArcGis	67
4.1.6	Analisi dei risultati e valutazioni	67
4.2	Prove Dinamiche	77
4.2.1	La fase di presa	77
4.2.2	La fase di orientamento	77
4.2.3	Elaborazione fotogrammetrica con AgiSoft PhotoScan	78
4.2.4	L'utilizzo di ArcGis	79
4.2.5	Analisi dei risultati e valutazioni conclusive	94
5	Conclusioni	97

Elenco delle figure

2.1	Descrizione della Legge di Snell.	2
2.2	Spazio immagine, a sinistra della lente, e spazio oggetto, a destra della lente.	3
2.3	Formazione dell'immagine nelle lenti sottili.	4
2.4	Punto focale e lunghezza focale.	5
2.5	Formazione delle immagini in funzione della posizione dell'oggetto rispetto alla lente.	6
2.6	Rappresentazione di un oggetto piano.	7
2.7	Gradi di libertà di un sistema rigido.	8
2.8	Ricostruzione della proiezione centrale.	9
2.9	Intersezione delle rette di due fotogrammi.	9
2.10	Quantità geometriche per la trattazione fotogrammetrica.	10
2.11	Allineamento di P', P, O lungo una retta.	11
2.12	Assi di riferimento del terreno e assi di riferimento del fotogramma.	12
2.13	Angoli di azimuth, elevation e roll.	14
2.14	Sistema ottico ideale.	15
2.15	Sistema ottico reale.	15
2.16	Formazione dell'immagine nel sistema ottico reale.	15
2.17	Distorsione radiale (Δr) e tangenziale (Δt) nelle lenti.	16
2.18	Parametri di orientamento esterno.	18
2.19	Orientamento relativo asimmetrico.	19
2.20	Orientamento relativo simmetrico.	20
2.21	Parallasse.	21
2.22	Orientamento assoluto.	22
2.23	Metodo delle stelle proiettive.	23
2.24	Profilo di distorsione radiale dal punto principale al bordo della CCD.	26
2.25	Bilanciamento della curva di distorsione.	27
2.26	Schematizzazione della camera fotogrammetrica.	29
2.27	Schema di presa lungo la direzione di volo.	30
2.28	Schema di presa lungo la direzione di volo.	31
3.1	La canaletta sperimentale presso il Laboratorio di Geologia Applicata del Dipartimento di Geoscienze dell'Università di Padova, costituita da due piani a pendenza variabile, e le telecamere usate per le applicazioni fotogrammetriche.	34
3.2	Apparato sperimentale per le prove di moto incanalato.	34
3.3	Apparato sperimentale per la determinazione dell'angolo d'attrito tra il materiale e la canaletta.	35
3.4	Curva caratterizzante il materiale granulare.	36
3.5	Andamento dell'angolo d'attrito medio calcolato per step di carico successivi.	37
3.6	Accumulo del materiale sulla canaletta posta orizzontalmente.	38
3.7	Determinazione manuale dell'angolo di riposo del materiale.	38
3.8	Nuova configurazione del materiale dopo aver variato la pendenza della canaletta.	39
3.9	Profilo longitudinale dell'ammasso granulare durante le prove per determinare l'angolo di natural declivio e l'angolo d'attrito dinamico.	40
3.10	Interfaccia del software di acquisizione scritto in Labview.	41
3.11	Sensore elettronico per la cattura e la memorizzazione dell'immagine mediante una camera fotografica digitale (Charged-Coupled Device).	43

3.12	La posizione del CCD.	44
3.13	Una immagine delle camere Ace GigE Basler utilizzate nelle sperimentazioni.	45
3.14	Il metodo per esprimere la grandezza del CCD: Optical Size.	45
3.15	Risposta spettrale delle camere utilizzate.	46
3.16	Sincronizzazione delle otto telecamere, al ventesimo frame di acquisizione, numerate partendo dall'alto a sinistra dalla cam0 alla cam7.	52
3.17	Sincronizzazione delle otto telecamere, all'ottantesimo frame di acquisizione, numerate partendo dall'alto a sinistra dalla cam0 alla cam7.	53
3.18	Progetto con telecamere a focale 6 mm e CCD da 1/1.8.	54
3.19	Progetto con telecamere a focale 8 mm e CCD da 1/1.8.	54
3.20	Progetto con telecamere a focale 12 mm e CCD da 1/1.8.	55
3.21	Fotogrammi presi dall'cam0 e cam7 durante le quattro acquisizioni. Partendo dall'alto dalla prima acquisizione alla quarta acquisizione.	56
3.22	Fotogrammi presi dalla cam2 durante le quattro acquisizioni. Partendo dall'alto dalla prima acquisizione alla quarta acquisizione.	57
3.23	Curve di distorsione radiale calcolate con camere poste a 2m di altezza.	58
3.24	Distorsione radiale per camere con focale 6mm.	58
3.25	Distorsione radiale per camere con focale 8mm.	59
3.26	Distorsione radiale per camere con focale 12.	59
3.27	Curve di distorsione radiale calcolate con i programmi <i>Australis</i> e <i>IWitness</i> per tutte le focali utilizzate.	60
4.1	Assetto sperimentale adottato in laboratorio per la prova statica	62
4.2	Fotogrammi ripresi dalle otto camere durante la prova statica.	69
4.3	Ambiente 3DViewer nel quale si può vedere la posizione delle camere, la posizione dei target retroflettenti e il sistema di riferimento.	70
4.4	Esempio di file contenente le coordinate dei GCP esportabile da <i>Australis</i>	70
4.5	Interfaccia del programma Leica utilizzato per l'elaborazione delle immagini.	71
4.6	Inserimento di GCP con il mirino.	71
4.7	Finestra di dialogo della funzione Automatic Tie Point Generation.	72
4.8	Finestra di dialogo della funzione Aerial Triangulation.	72
4.9	Generazione della nuvola di punti a seguito dell'allineamento delle camere.	72
4.10	Esempio di ortofoto prodotta dal programma Agisoft PhotoScan	73
4.11	Kriging della prova statica con riportati al di sopra i punti sperimentali calcolati.	73
4.12	TIN prodotto dalla prova statica. Sopra riportate le tracce dei profili effettuati.	74
4.13	Profilo longitudinale e trasversale dell'ammasso granulare determinati a seguito dell'elaborazione fotogrammetrica e del TIN prodotto.	75
4.14	Canaletta in 3D elaborata in ambiente GIS attraverso l'uso di target retroflettenti e punti inseriti disegnati al fondo della canaletta.	76
4.15	Situazione al momento della prova dinamica: posizione delle camere e presenza sul piano di monte della canaletta per simulare il moto incanalato del materiale.	77
4.16	Fotogrammi ripresi dalle otto camere durante la prova dinamica al t=1.35 s.	81
4.17	Fotogrammi ripresi dalle otto camere durante la prova dinamica al t=1.8 s.	82
4.18	Fotogrammi ripresi dalle otto camere durante la prova dinamica al t=2.5 s.	83
4.19	Risultato del TIN per la prova t = 1,35 s. I punti sperimentali sono riportati al di sopra in colore fucsia. Viengono mostrate le tracce dei profili	84
4.20	Profili trasversali n 1, 2, 3 condotti sul TIN prodotto dall'elaborazione dell'istante t = 1,35s.	85
4.21	Profilo longitudinale condotto sul TIN della prova dinamica per t = 1,35s.	86
4.22	Ricostruzione tridimensionale sul piano della canaletta dell'ammasso granulare in movimento al t = 1,35s.	86
4.23	Risultato del TIN per la prova t = 1,8 s. I punti sperimentali sono riportati al di sopra in colore fucsia. Vengono mostrate le tracce dei profili.	88
4.24	Profili trasversali n 1, 2, 3 condotti sul TIN prodotto dall'elaborazione dell'istante t = 1,8s.	89
4.25	Profili trasversali n 4, 5 condotti sul TIN prodotto dall'elaborazione dell'istante t = 1,8s.	90
4.26	Profilo longitudinale condotto sul TIN della prova dinamica per t = 1,8s.	90
4.27	Ricostruzione tridimensionale sul piano della canaletta dell'ammasso granulare in movimento al t = 1,8s.	91

4.28 Risultato del TIN per la prova $t= 2,5s$. I punti sperimentali sono riportati al di sopra in colore fucsia. Viengono mostrate le tracce dei profili	93
4.29 Profili trasversali n 4, 5 condotti sul TIN prodotto dall'elaborazione dell'istante $t = 2,5s$. .	94
4.30 Profilo longitudinale condotto sul TIN della prova dinamica per $t = 2,5s$	95
4.31 Ricostruzione tridimensionale sul piano della canaletta dell'ammasso granulare in movimento a $t = 2,5 s$	95
4.32 Confronto tra i profili longitudinali condotti nelle tre prove con il piano della canaletta riportato al di sotto.	96

Elenco delle tabelle

3.1	Risultato delle prove per i 4 step di carico..	36
3.2	Pendenza della canaletta e angolo di natural declivio del materiale calcolato durante le prove.	37
3.3	Confronto tra i valori sperimentali determinati sul deposito e i valori calcolati dal modello tridimensionale elaborato dal programma Agisoft Photoscan.	39
3.4	Confronto tra i valori sperimentali determinati sul deposito e i valori calcolati dal modello tridimensionale elaborato dal programma Agisoft Photoscan.	39
3.5	Specifiche delle camere Basler acA 1600-20 gm/gc..	46
3.6	I parametri di orientamento interno a seguito della calibrazione effettuata per altezze delle camere di 2 m e di 1.15 m.	50
3.7	Risultati della calibrazione con i due programmi Australis e iWitness con le telecamere poste a 2m di altezza.	51

Capitolo 1

Introduzione

Le valli montane contengono vaste aree periodicamente esposte a fenomeni di movimenti di massa rapidi spesso disastrosi (colate di detriti, valanghe di neve e di roccia). Questi fenomeni sono particolarmente rilevanti su tutto l'arco Alpino e sono spesso caratterizzati dalla mobilitazione di grandi volumi depositati sui conoidi alluvionali.

Le differenze nelle distanze di run out dei depositi osservati e l'estensione delle aree alluvionate, possono essere spiegate in termini delle proprietà reologiche del materiale di flusso, del volume di detrito mobilizzato e della meccanica del flusso. La valutazione di possibili scenari di pericolo sui conoidi è comunemente di primario interesse nelle aree montane. Per la riduzione del rischio potenziale associato vengono progettate diverse contromisure strutturali e gestionali.

Un punto fondamentale per delineare correttamente sia le aree esposte ai fenomeni indicati sui conoidi sia il comportamento del flusso, in modo da evitare errori pericolosi che possono portare ad una sottostima delle dimensioni delle opere di controllo, è arrivare ad una sufficiente conoscenza della reologia del flusso.

La descrizione delle proprietà dinamiche dei flussi degli ammassi granulari viene affrontata dalla comunità scientifica nazionale ed internazionale mediante l'osservazione di campo, la formulazione di modelli fisico-matematico-numeriche e mediante la simulazione in laboratorio degli eventi naturali o di particolari aspetti degli stessi. L'osservazione di campo è generalmente il punto di partenza della ricerca, anche se la capacità di descrivere adeguatamente le molte variabili in gioco è ancora piuttosto bassa.

Per questa ragione molto lavoro viene svolto nel tentativo di descrivere il comportamento dei fenomeni naturali mediante la modellazione fisico-matematico-numerica ([15], [16]). Alla modellazione numerica viene spesso affiancata la modellazione fisica in laboratorio con lo scopo di riprodurre, in scala ridotta, i fenomeni reali e di testare la capacità dei modelli numerici di descrivere adeguatamente il fenomeno fisico riprodotto secondo le regole della teoria della similitudine.

L'importanza della formulazione di modelli numerici affidabili appare sempre più grande in conseguenza della esigenza, ormai particolarmente sentita, di poter stabilire, a fini urbanistici, il rischio idrogeologico al quale una porzione di territorio è soggetta.

Diverse canalette sperimentali sono state realizzate ([17], [18],[19]) allo scopo di riprodurre in laboratorio la dinamica di flussi granulari. Nella maggior parte dei casi le tecniche di laboratorio e gli strumenti di misura vengono usati per descrivere alcune proprietà locali della dinamica degli ammassi granulari bifasici o trifasici (presenza di liquido intergranulare).

Lo spessore locale viene misurato con distanziometri laser o ultrasonici. Mediante la anemometria laser Doppler è possibile misurare la velocità in un punto del campo di moto, mentre la PIV permette di seguire la traiettoria di una particella allo scopo di valutarne la velocità e le grandezze correlate.

Forze e pressioni vengono misurate in modo non intrusivo collocando celle di carico sulla superficie di contenimento, ed in modo intrusivo per valutare forze di impatto su ostacoli e strutture.

La descrizione della distribuzione spaziale della profondità di scorrimento viene spesso realizzata lungo linee stabilite da piani laser o segmenti laser, accoppiando tecniche di rilevamento ottico.

Il rilievo delle proprietà dinamiche internamente alla massa è ancora ambito di ricerca sperimentale (matching ottico, interferometria radar).

Il rilievo tridimensionale dinamico dell'intero o di parte del campo di moto (dtm in funzione del tempo), oggetto del presente lavoro di tesi, si ritiene possa essere ottenuto con tecniche fotogrammetriche da terra ([20]).

La fotogrammetria da terra trova diffusa applicazione nel monitoraggio delle frane a cinematica lenta e nel rilievo dell'evoluzione morfologica degli alvei ([21], [22]). Più rara è la sua applicazione al monitoraggio di movimenti di massa rapidi, quali le colate detritiche, le valanghe di neve densa e le valanghe di roccia, sia sul campo che in laboratorio ([23], [24]).

La tecnica fotogrammetrica terrestre presenta, in condizioni quasi statiche, numerosi vantaggi, quali l'accoppiamento di informazioni metriche e visive, accuratezza nelle misure, notevole risoluzione spaziale, ridotti tempi di esecuzione dei rilievi, portabilità degli strumenti di misura, relativa economicità. Verificate queste proprietà anche in condizioni dinamiche, la tecnica appare di notevole interesse anche per le applicazioni sul campo per la misura di alcuni aspetti di fenomeni naturali rapidamente variabili nel tempo. Inoltre, la descrizione spaziale della profondità dell'intero campo di moto può fornire dati estremamente utili alla taratura dei modelli matematici, soprattutto per quello che riguarda la fase di espansione in zona di arresto.

La tecnica del rilievo fotogrammetrico dinamico viene sperimentata in laboratorio utilizzando un apparato sperimentale costituito da due piani a pendenza variabile supportati da una struttura metallica. L'ingombro dell'apparato sperimentale è di circa 4 m in lunghezza, 2 m circa in larghezza e 3 m in altezza. I due piani, realizzati in plexiglas, sono di forma quadrata e di lato 1.5 m e sono incernierati al fine di creare continuità tra un piano di monte ed un piano di valle. Il piano di monte, a pendenza più elevata, permette di simulare la zona di scorrimento. Il piano di valle simula la zona di arresto dei flussi di ammassi granulari. La struttura metallica di supporto permette il posizionamento automatico dei piani alla pendenza stabilita mediante pistoni oleodinamici. Il piano di monte ospita il sistema di rilascio del materiale granulare, costituito da una scatola di carico chiusa a valle da una paratoia azionabile impulsivamente. Il moto dell'ammasso granulare potrà essere incanalato o di versante sia sul piano di monte che sul piano di valle.

L'hardware fotogrammetrico è costituito da otto video-camere digitali dotate di sensore CCD con numero di pixel effettivo pari a $2M$. Le video-camere, non metriche, vengono sottoposte al processo di taratura fotogrammetrica, allo scopo di limitare gli effetti di distorsione delle ottiche. La frequenza di acquisizione massima è di 25 Hz.

La analisi fotogrammetrica viene realizzata mediante hardware e software dedicati.

Il lavoro di tesi, di seguito presentato, si incentra sulla realizzazione di una procedura sperimentale che permetta il rilievo topografico dinamico tri-dimensionale di ammassi granulari in rapido movimento. Oggetto del lavoro sono lo studio e la ottimizzazione della configurazione sperimentale, software e hardware più adatta allo scopo.

Capitolo 2

Tecniche Fotogrammetriche

2.0.1 Introduzione

L' American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) definisce la fotogrammetria come "l'arte, la scienza e la tecnologia necessarie per ottenere informazioni affidabili sugli oggetti reali e sull'ambiente attraverso un processo di riproduzione, misura e interpretazione di immagini fotografiche e di modelli di radiazioni elettromagnetica e di altri fenomeni" ([1]).

Quindi la fotogrammetria è una tecnica che consente di determinare metricamente la forma, la dimensione e la posizione di un oggetto avendo come dati di partenza almeno due distinte riprese fotografiche o fotogrammi che dovrebbero risultare essere delle proiezioni centrali dell'oggetto stesso. Questa tecnica di rilievo si basa su teorie sviluppatesi ancor prima dell'invenzione della fotografia come geometria proiettiva. Applicata principalmente per il rilevamento del territorio, fino a poco tempo fa veniva utilizzata esclusivamente in fotogrammetria aerea e la sua diffusione in altri settori era di certo ostacolata dall'elevato costo e dalla complessità degli apparecchi utilizzati. Lo sviluppo recente di calcolatori potenti assieme alle innovazioni della computer grafica ha portato all'elaborazione del processo di rilievo fotogrammetrico in ambiente digitale e al conseguente abbandono delle ormai obsolete strumentazioni ottico-meccaniche. Questo ha comportato una maggiore applicazione della fotogrammetria anche in settori come ambiente e territorio, urbanistica e architettura dove la sua natura di tecnica non invasiva e non distruttiva ha un'importanza fondamentale.

Per ottenere un modello tridimensionale dell'oggetto di interesse, scopo dell'elaborazione fotogrammetrica, si devono eseguire i seguenti passaggi:

- presa stereografica della zona interessata;
- rilievo dei punti di appoggio;
- orientamento interno e esterno;
- restituzione tridimensionale.

L'elaborazione del 3D avviene in modo semiautomatico grazie all'utilizzo di uno strumento restitutore cioè un software specifico in grado di ricostruire da solo l'orientamento dei fotogrammi sulla base di pochi punti di cui sono note le coordinate di base. Di programmi atti a questo tipo di elaborazione ce ne sono molti a disposizione e variano per precisione, affidabilità e costi. Stà all'operatore valutare il suo caso di studio e scegliere il software più adeguato.

Non bisogna inoltre dimenticare che la fotogrammetria è e rimarrà una disciplina molto complessa che richiede competenze vaste sia di livello base come, ad esempio, la conoscenza dell'ottica geometrica e delle equazioni di collinearità, conoscenze approfondite dei programmi utilizzati, nonchè l'acquisizione di esperienza in materia. Solo a questo punto i risultati ottenuti potranno dirsi attendibili.

2.1 Ottica Geometrica

L'ottica geometrica studia la propagazione della luce mediante raggi. Quando la luce incontra una superficie che separa due materiali dielettrici differenti, subisce una variazione di direzione descrivibile attraverso

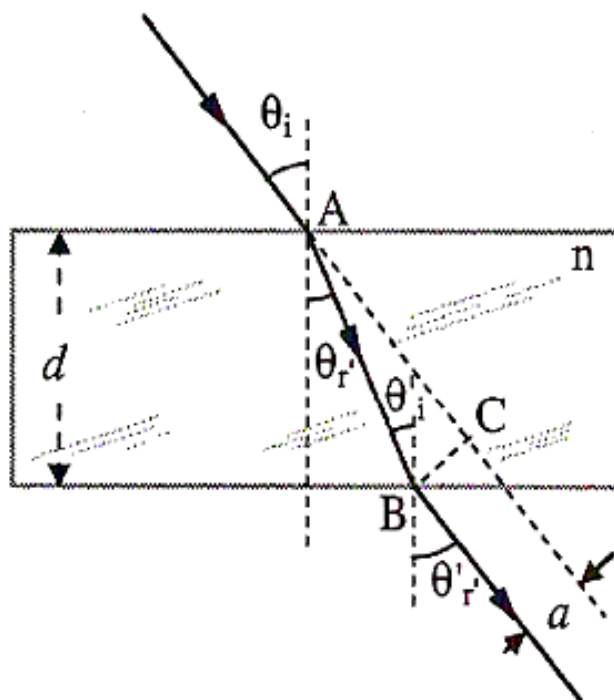


Figura 2.1: Descrizione della Legge di Snell.

semplici regole. Si utilizza il raggio come rappresentazione semplice della direzione di propagazione del fascio di luce (infiniti raggi tra loro paralleli) o dell'onda piana (infiniti raggi paralleli che occupano l'intero spazio). L'ottica geometrica viene utilizzata per capire, in modo semplice, il funzionamento di componenti ottici come specchi, lenti e strumenti ottici in generale. Nel nostro caso ci è utile nel comprendere appieno il funzionamento delle telecamere.

Quando un raggio incide sulla superficie di discontinuità (Figura 2.1) parte di esso viene trasmesso (fenomeno della rifrazione) mentre la restante parte viene riflessa (fenomeno della riflessione). Indicando con θ_1 l'angolo di incidenza e θ_2 l'angolo di rifrazione rispetto alla perpendicolare alla superficie di discontinuità e con n_1 e n_2 gli indici di rifrazione dei mezzi attraversati vale la nota *legge della rifrazione* (o di Snell) :

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.1)$$

Inoltre se prendiamo in considerazione l'angolo di riflessione θ' e la regola del segno di un angolo per la quale se ruoto il raggio in senso orario il segno sarà positivo allora vale la *legge della riflessione* :

$$\theta_1 = -\theta'_1. \quad (2.2)$$

Secondo tale legge l'angolo di riflessione è uguale in valore assoluto a quello di incidenza.

2.1.1 Le lenti

Le lenti sono costituite, in genere, da materiale dielettrico (trasparente alla parte dello spettro elettromagnetico che corrisponde al visibile), di solito delimitato da due superfici sferiche. Proprio la sfericità della lente garantisce un angolo di rifrazione costante e la convergenza dei raggi luminosi in un solo piano.

Quando si parla di lenti bisogna distinguere lo spazio immagine dallo spazio oggetto. Si consideri la Figura 2.2, ed il punto A da cui parte un raggio che raggiunge in P la superficie sferica, il cui centro è situato in C . Il raggio subisce rifrazione in P e va ad intersecare la retta passante per A e C in A' .

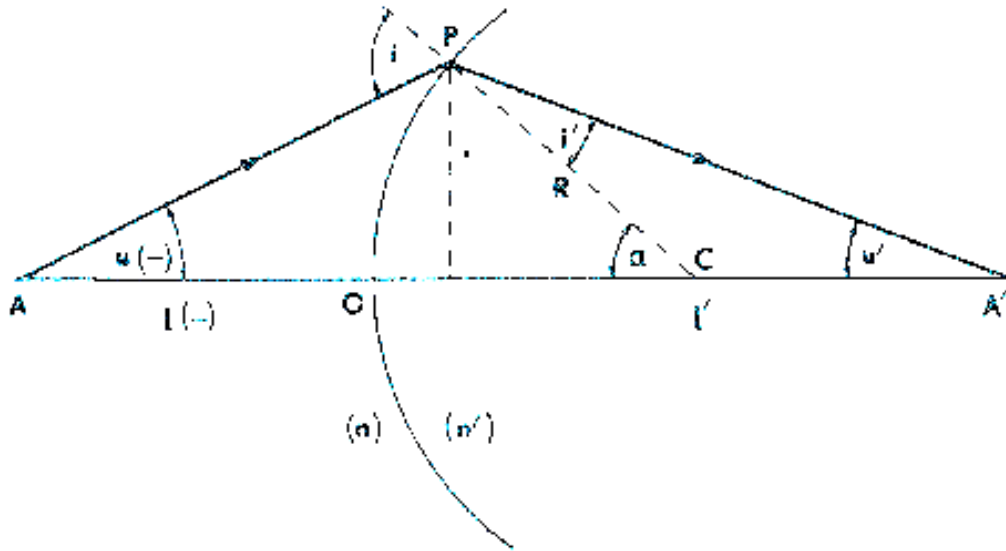


Figura 2.2: Spazio immagine, a sinistra della lente, e spazio oggetto, a destra della lente.

A' è l'immagine di A . Per stabilire la relazione tra A e A' si adottano le seguenti convenzioni: tutte le quantità che si trovano nello spazio oggetto (a sinistra della discontinuità) sono rappresentate prive di apice, mentre quelle nello spazio immagine devono averlo. Le distanze di punti che si trovano a destra o al di sopra del punto O (intersezione della superficie sferica con l'asse passante per A e C) sono positive. Il segno degli angoli viene determinato trigonometricamente([6]).

Per il triangolo PAC riportato in Figura 2.2 si può scrivere:

$$\pi + u + \alpha - i = \pi \tag{2.3}$$

dalla quale:

$$i = u + \alpha \tag{2.4}$$

per il triangolo PCA' invece si ha:

$$\pi - \alpha + i' + u' = \pi \tag{2.5}$$

dalla quale:

$$i' = \alpha - u'. \tag{2.6}$$

Allo studio delle lenti si applica l'approssimazione parassiale cioè si ipotizza che i raggi formino angoli piccoli con l'asse e quindi si avrà un y piccolo rispetto a l , l' e R ; e piccoli saranno pure i ed i' i cui seni e tangenti potranno essere approssimati agli angoli stessi. Date queste assunzioni la legge di Snell applicata nel punto P risulta essere:

$$in = n'i'. \tag{2.7}$$

Sostituendo nella 2.7 la 2.4 e la 2.6, si può scrivere:

$$n(u + \alpha) = n'(\alpha - u'). \tag{2.8}$$

Nell'ipotesi di raggi parassiali:

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{l}y \\ u' &= \frac{y}{l'} \\ \alpha &= \frac{1}{R}y \end{aligned} \tag{2.9}$$

la 2.8 diventa:

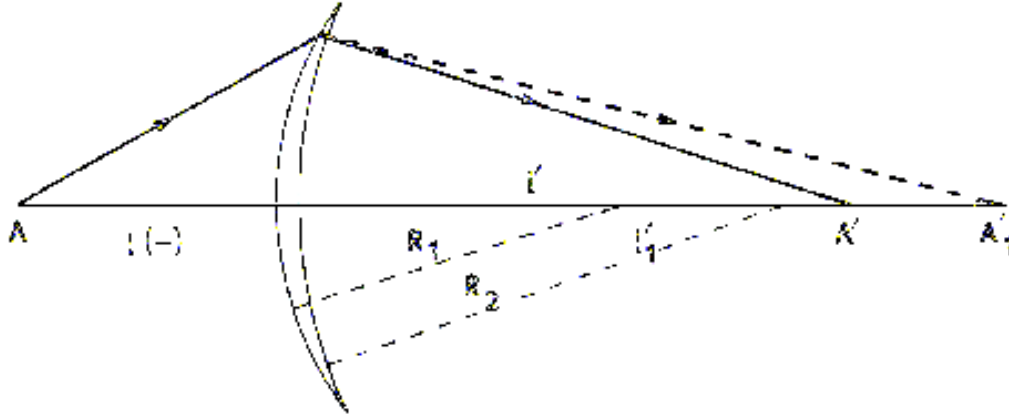


Figura 2.3: Formazione dell'immagine nelle lenti sottili.

$$n \left(\frac{1}{R} y + \frac{1}{l} y \right) = n' \left(\frac{1}{R} y - \frac{y}{l'} \right). \quad (2.10)$$

Dividendo per il fattore comune y e ordinando:

$$\frac{1}{l} n + \frac{n'}{l'} = \frac{1}{R} (n' - n). \quad (2.11)$$

Per la convenzione dei segni la distanza l deve essere negativa e quindi la relazione che lega la posizione dell'oggetto A alla sua immagine A' è:

$$\frac{n'}{l'} - \frac{1}{l} n = \frac{1}{R} (n' - n) \quad (2.12)$$

A e A' sono punti coniugati come le loro distanze l e l' .

Se l'ipotesi di raggi parassali non è più valida, cioè la distanza tra P e O non è più trascurabile, i raggi incidono sull'asse in punti attorno ad A' . Questo fenomeno prende il nome di *aberrazione*.

Si ipotizzi, ora, di utilizzare una *lente sottile* (la cui distanza tra le sue due superfici sferiche è assumibile come piccola rispetto alle quantità l , l' , R) con un indice di rifrazione pari a n . La lente è posta a contatto con l'aria ($n \approx 1$, Figura 2.3). La posizione l'_1 dell'immagine dovuta alla superficie di discontinuità di raggio R_1 è data da:

$$\frac{n}{l'_1} - \frac{1}{l} = \frac{1}{R_1} (n - 1). \quad (2.13)$$

Il raggio non arriva in A'_1 perché è intercettato dalla seconda superficie di discontinuità di raggio R_2 . Questa si comporta come se l'oggetto fosse posizionato in A'_1 , alla distanza l'_1 dal centro della lente. Applico l'equazione di discontinuità per la seconda superficie ottenendo:

$$\frac{1}{l'} - \frac{n}{l'_1} = \frac{1}{R_2} (1 - n). \quad (2.14)$$

Sommando le equazioni 2.13 e 2.14 ottengo:

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right). \quad (2.15)$$

Definisco l'inverso di f' come:

$$\frac{1}{f'} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.16)$$

eguagliando ottengo:

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f'} \quad (2.17)$$

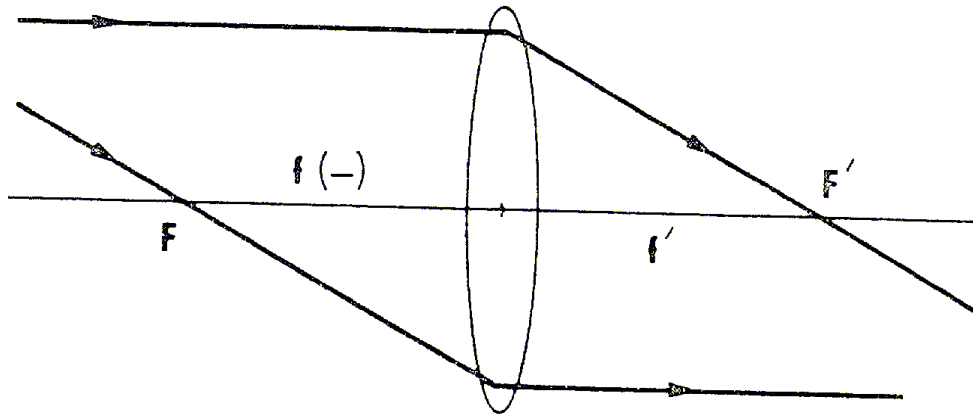


Figura 2.4: Punto focale e lunghezza focale.

chiamata *Equazione della lente* nella quale f' prende il nome di *lunghezza focale* e rappresenta la posizione dell'immagine del punto oggetto che si trova all'infinito o il punto dove convergono tutti i raggi paralleli all'asse che provengono dall'infinito. Questo punto è chiamato *punto focale secondario* (fuoco) F' ; mentre i raggi paralleli all'asse che provengono da destra definiscono il punto focale primario F (Figura 2.4). Inoltre dall'eq. 2.17 risulta:

$$f = -f'. \quad (2.18)$$

2.1.2 Come costruire l'immagine

L'immagine di un punto oggetto può essere costruita graficamente applicando al percorso dei raggi queste regole: un raggio parallelo all'asse passa per il fuoco della lente dopo averla attraversata, un raggio che passa per il fuoco della lente procede parallelo all'asse dopo averla attraversata, un raggio che passa per il centro della lente non subisce deviazioni.

2.1.3 Tipi di lenti

Le lenti standard possono essere suddivise in *positive* o convergenti, cioè quelle che deflettono su un punto dell'asse, chiamato *fuoco*, tutti i raggi paralleli all'asse che l'attraversano, e *negative* o divergenti, che presentano comportamento opposto. Altra differenza sta nello spessore delle lenti: quelle positive lo sono maggiormente al centro rispetto ai bordi, il contrario vale per quelle negative.

L'equazione delle lenti permette di determinare a quale distanza dal fuoco e dalla lente si forma l'immagine. Di seguito vediamo i casi possibili (Figura 2.5):

- Caso 1:** l'oggetto è a distanza infinita, i suoi raggi giungono sulla lente paralleli, l'immagine che si crea è un punto situato nel fuoco reale F ;
- 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, rimpicciolita e situata tra F e $2F$, dalla parte opposta della lente. Le lenti della macchina fotografica rientrano in 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, in $2F$ dalla parte opposta della lente;
- Caso 4:** l'oggetto si trova tra la doppia distanza focale e il fuoco. L'immagine è reale, capovolta, ingrandita e situata al di là di $2F$, dalla parte opposta della lente;
- Caso 5:** l'oggetto si trova nel fuoco principale. In questo caso non si ha la formazione dell'immagine poiché i raggi luminosi rifratti escono dalla lente paralleli tra loro;

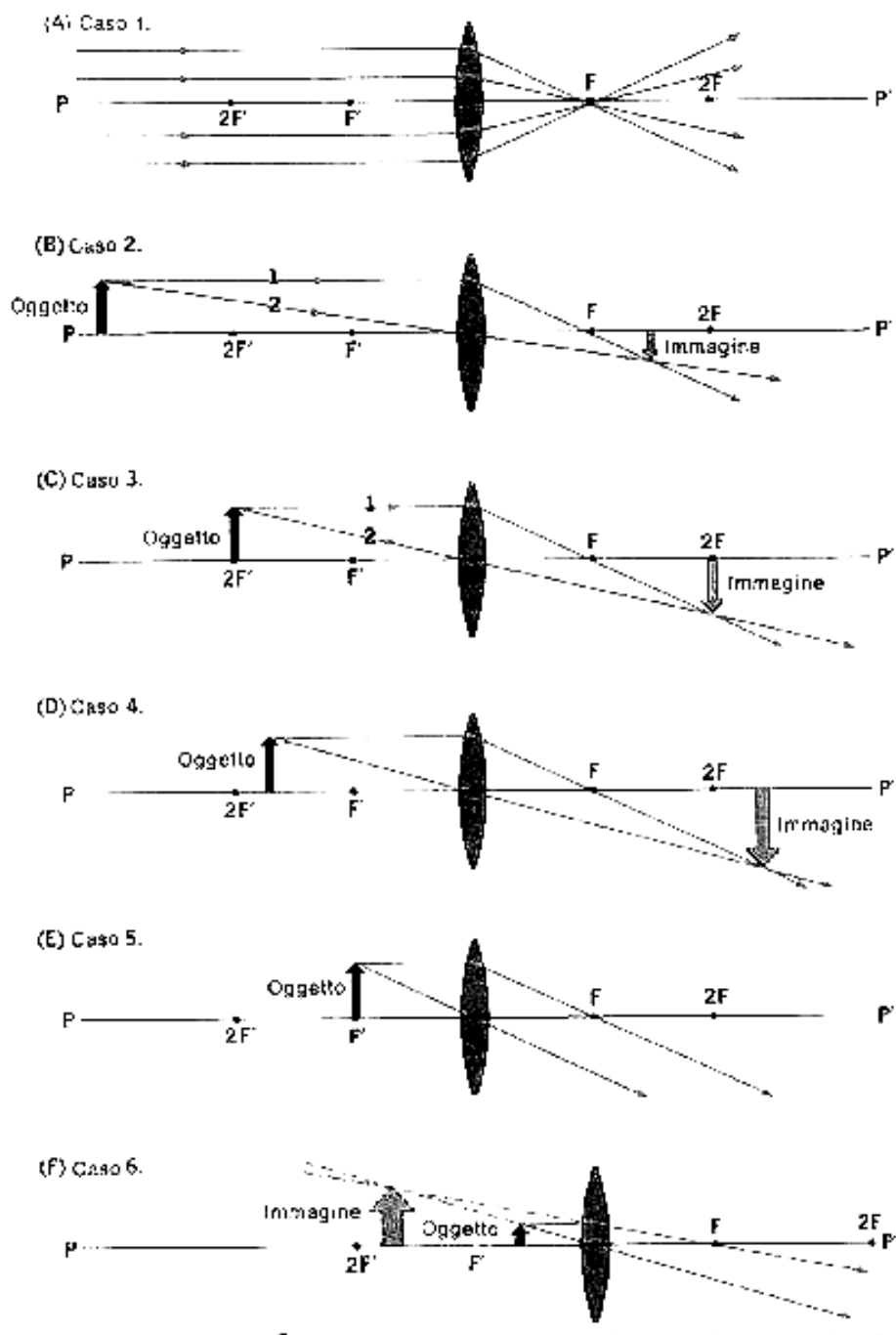


Figura 2.5: Formazione delle immagini in funzione della posizione dell'oggetto rispetto alla lente.

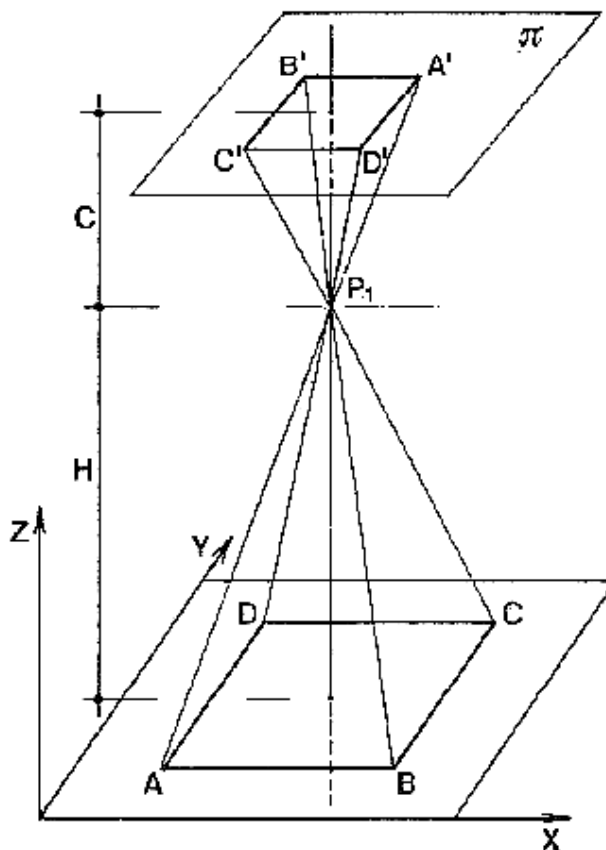


Figura 2.6: Rappresentazione di un oggetto piano.

Caso 6: l'oggetto si trova tra il fuoco principale e la lente. I raggi rifratti escono divergenti dalla lente e quindi non possono dare origine, dalla parte opposta della lente, ad un'immagine reale. Convergono invece i loro prolungamenti dalla parte della lente dove si trova l'oggetto, formando così un'immagine virtuale, diritta, ingrandita.

2.2 Teoria Fotogrammetrica

Una fotografia, metricamente, è una proiezione centrale dell'oggetto sul proprio piano.

Se l'oggetto è piano, e il centro di proiezione O (Figura 2.6) e il piano su cui si effettua la proiezione sono noti rispetto al sistema di assi (X, Y, Z) , per descriverlo basta un solo fotogramma.

Se l'oggetto è tridimensionale per descriverlo occorrono due distinti fotogrammi. In questo caso deve esistere una corrispondenza biunivoca fra i punti oggetto e i punti immagine sui due fotogrammi ([2]).

La camera può essere considerata come un corpo rigido nello spazio e quindi ha 6 gradi di libertà che vanno fissati per poterne definire la posizione (Figura 2.7):

3 gradi di libertà: coordinate del centro di proiezione O (X_0, Y_0, Z_0) al momento della presa;

3 gradi di libertà: angoli di rotazione $(\omega, \varphi, \kappa)$ attorno a X, Y, Z del fotogramma rispetto al centro di proiezione O .

Per poter ricostruire l'oggetto tridimensionale è necessario avere quindi almeno due fotogrammi e riproiettarli nota la posizione spaziale delle camere al momento degli scatti. Ciò vuol dire conoscere $X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa$ di entrambi gli scatti. Questi 12 parametri vanno determinati durante le fasi di ricostruzione della proiettività.

Il procedimento di ricostruzione della posizione spaziale delle camere può essere suddiviso in 4 passaggi successivi.

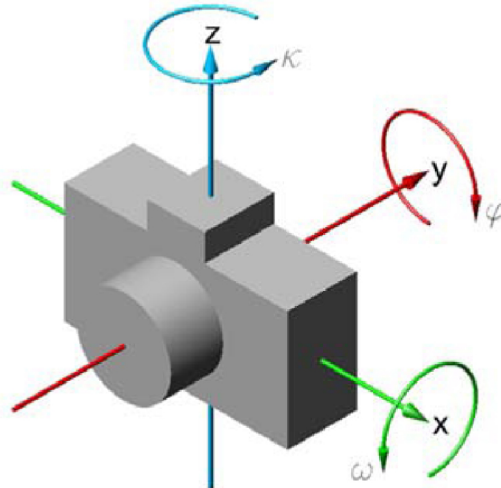


Figura 2.7: Gradi di libertà di un sistema rigido.

Orientamento interno: in questa fase si deve ricostruire la proiezione centrale. Questo è possibile se è nota la distanza c (Figura 2.8) del centro di proiezione O (punto di presa) dal piano π e se si conoscono le coordinate del punto principale PP , traccia della normale al fotogramma passante per O (asse di presa);

Orientamento relativo: in questa fase si deve ricostruire il modello ottico attraverso l'intersezione delle rette che nella proiezione corrispondono (Figura 2.9):

Si procede in questo modo: si mette in una posizione qualsiasi la camera corrispondente al primo scatto e si calcolano 5 dei 6 parametri che descrivono i gradi di libertà della seconda camera. Bastano 5 parametri perchè la posizione di O_2 lungo la retta che lo congiunge ad O_1 è trascurabile ai fini dell'intersezione dei raggi corrispondenti proiettati da O_1 e O_2 . Se la posizione delle due camere è uguale, allora riproiettando le immagini si otterrà un modello ottico simile all'oggetto fotografato le cui dimensioni saranno in scala ridotta e la cui posizione sarà in generale diversa da quella dell'oggetto stesso.

Dimensionamento del modello ottico: per mettere in scala la figura occorre conoscere la distanza tra O_1 e O_2 al momento della presa che viene assunta uguale alla base di presa o meglio ancora alla distanza fra i due centri di proiezione. In questo modo viene fissato il sesto grado di libertà della camera 2 rispetto alla camera 1;

Orientamento assoluto: ora il modello ottico ha forma e dimensione corrette e va collocato nella corretta posizione spaziale rispetto al sistema di riferimento X, Y, Z scelto per l'oggetto che si vuole ricostruire.

2.3 Fasi del processo fotogrammetrico

2.3.1 Presa fotogrammetrica

Le immagini da utilizzare in fotogrammetria devono essere tali da poter permettere la ricostruzione della proiezione centrale durante l'orientamento interno.

Le operazioni da svolgere sono le seguenti:

- impressionare la pellicola (o CCD);
- sviluppo, riproduzione ed eventuale stampa nella quale si mantiene geometria dell'immagine (rispetto al centro di proiezione) e nitidezza.

Gli eventuali problemi che si possono incontrare in questa fase sono legati alla costruzione delle camere fotografiche e degli obiettivi che queste montano. Inoltre la posizione interna della CCD e lo stesso trasferimento e trattamento delle immagini possono aumentarne l'imprecisione.

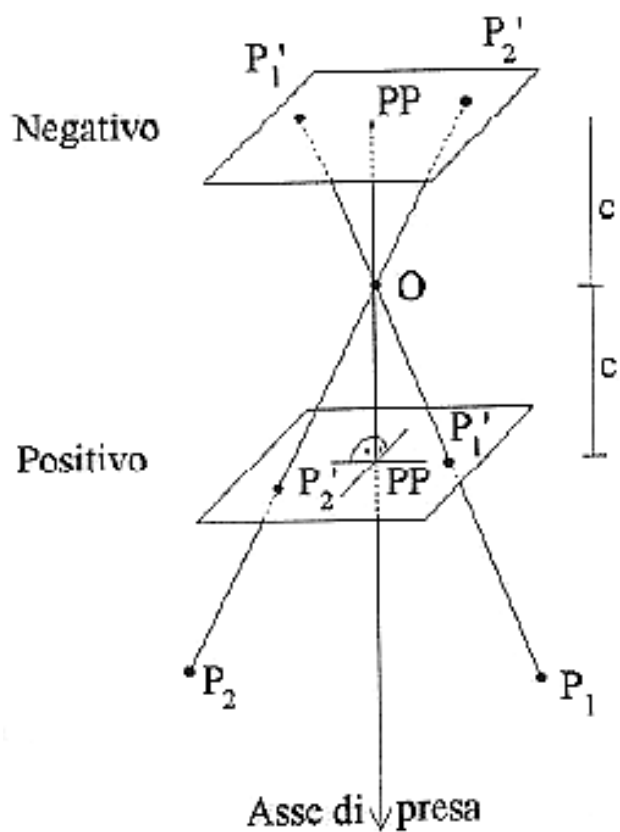


Figura 2.8: Ricostruzione della proiezione centrale.

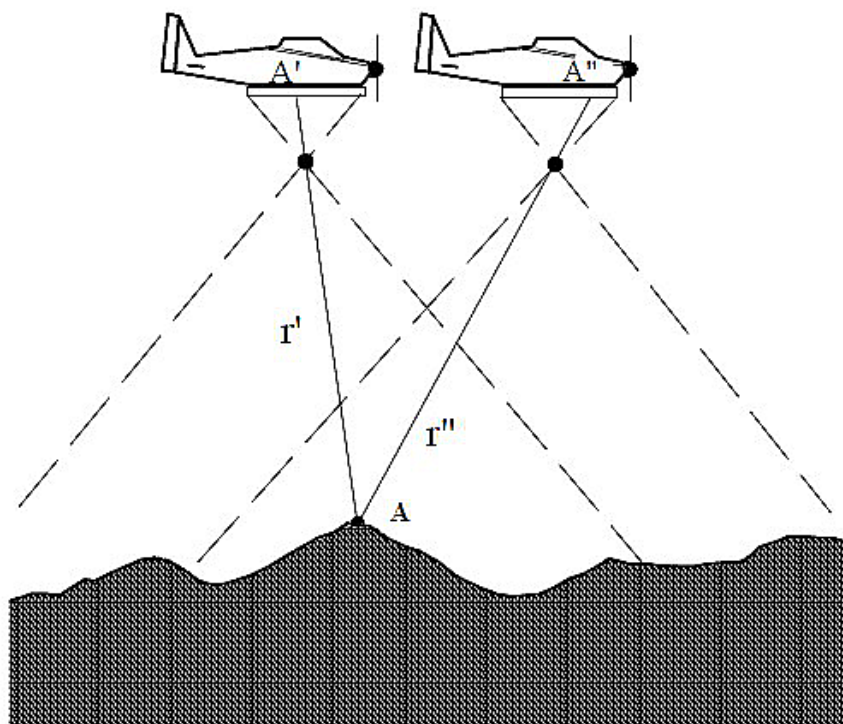


Figura 2.9: Intersezione delle rette di due fotogrammi.

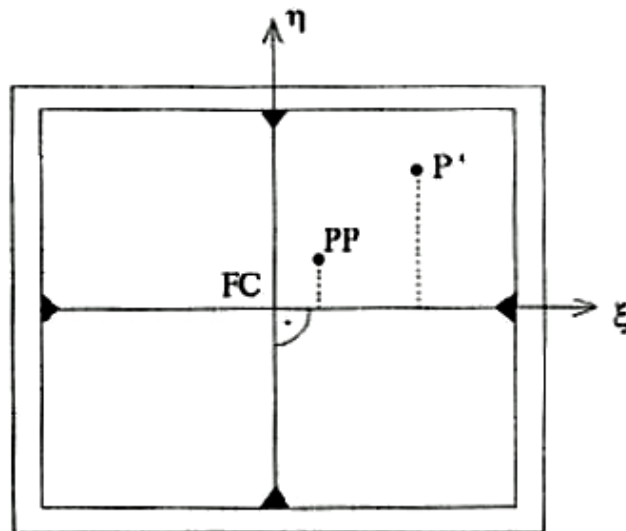


Figura 2.10: Quantità geometriche per la trattazione fotogrammetrica.

2.3.2 Punti d'appoggio topografici

Per ottenere l'orientamento assoluto sono necessari parametri esterni ottenibili attraverso la determinazione topografica di coordinate di punti del terreno. In questa fase i possibili problemi risiedono nella scelta dei punti da determinare (il loro numero, la loro posizione e il loro riconoscimento visivo attraverso target). La strumentazione e il metodo di misura vanno scelti in modo oculato.

2.3.3 Restituzione

È la fase fotogrammetrica più importante. In questa fase il modello ottico ottenuto può essere osservato attraverso "restitutori" che ne permettono la visione tridimensionale. La visione può essere ottenuta attraverso modelli analogici (uso di stereoscopi) o modelli analitici (uso di calcolatori elettronici).

Per **modello ottico** si intende l'oggetto 3D che appare dall'elaborazione di due fotogrammi la cui parte in comune deve essere almeno del 50%.

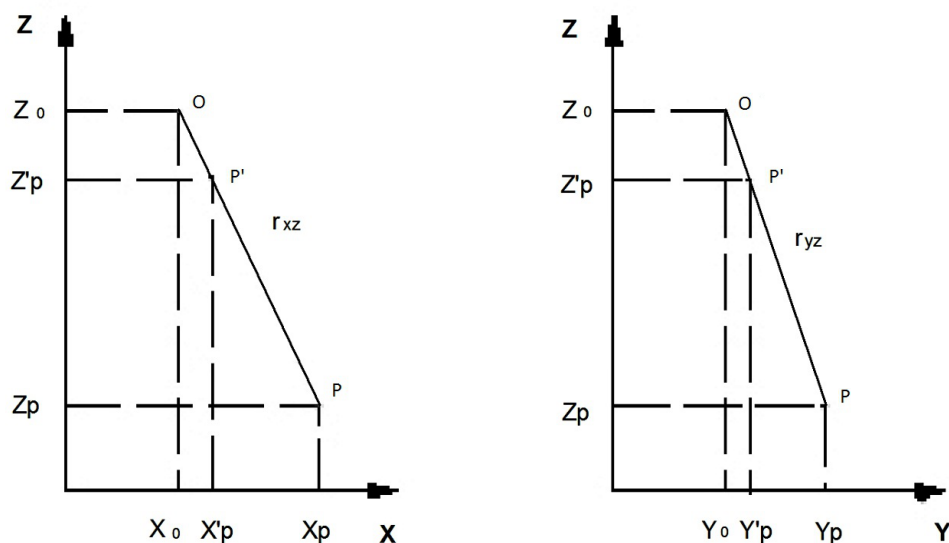
I **restitutori** invece possono essere analogici, analitici o digitali. Quelli *analogici* sono degli strumenti che hanno fatto la storia della fotogrammetria ma ormai ritenuti obsoleti anche se ancora molto diffusi. In questi restitutori la ricomposizione dei raggi omologhi avviene per analogia allo schema della presa. I raggi proiettivi, dopo aver ricostruito in laboratorio lo schema della presa, vengono realizzati con bacchette metalliche (restitutori meccanici) o con raggi ottici (restitutori ottici). Il restitutore *analitico* ricostruisce i raggi omologhi analiticamente a partire dalle coordinate di lastra dei punti omologhi misurate da uno stereocomparatore; il suo uso ha soppiantato il restitutore analogico.

Il restitutore digitale è costituito da un computer nel quale vengono caricate immagini digitali dove l'osservazione stereoscopica può avvenire in più modi.

Per poter determinare forma e posizione degli oggetti occorre conoscere le relazioni geometriche sulle quali si sono formate le immagini fotogrammetriche (Figura 2.10).

Per questo definiamo come fotogramma la prospettiva centrale nello spazio e inoltre definiamo le altre quantità geometriche necessarie nella trattazione fotogrammetrica visibili in Figura 2.8 e Figura 2.10:

- Centro di proiezione O ;
- Punto principale PP ;
- Centro fiduciale FC ;


 Figura 2.11: Allineamento di P' , P , O lungo una retta.

- Distanza principale c ;
- Coordinate del fotogramma o coordinate immagine ε, η ;
- Coordinate del terreno X, Y, Z .

2.4 Condizioni di collinearità

Le equazioni di collinearità rappresentano le relazioni che intercorrono tra le coordinate del punto immagine P' , le coordinate del corrispondente punto oggetto P e le coordinate del punto di presa O (Figura 2.11).

Importante notare come questi tre punti (P' , P , O) sono allineati lungo una retta e il loro legame può essere espresso come:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \varepsilon(\varepsilon_0, c, X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa, X, Y, Z) \\ \eta &= \eta(\eta_0, c, X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa, X, Y, Z) \end{aligned} \quad (2.19)$$

dove:

ε_0, η_0, c sono parametri di orientamento interno della camera;

$X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa$ sono i parametri di orientamento esterno del fotogramma;

X, Y, Z sono le coordinate terreno del punto oggetto P ;

ε, η sono le coordinate immagine del punto immagine P' .

È importante ricordare che ad ogni punto oggetto corrisponde un solo punto immagine ma che il contrario non è vero. Infatti, se si volessero ricavare le coordinate terreno a partire dalle coordinate immagine il sistema di eq. 2.19 fornirebbe le seguenti relazioni:

$$\begin{aligned} X &= X(\varepsilon_0, \eta_0, c, X_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa, \varepsilon, \eta, Z) \\ Y &= Y(\varepsilon_0, \eta_0, c, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa, \varepsilon, \eta, Z) \end{aligned} \quad (2.20)$$

dove al secondo membro compaiono:

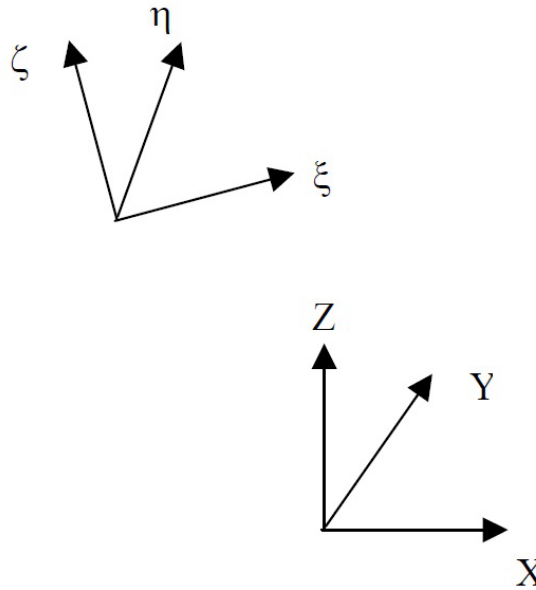


Figura 2.12: Assi di riferimento del terreno e assi di riferimento del fotogramma.

- ε_0, η_0, c parametri di orientamento interno;
 - $X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa$ parametri di orientamento esterno;
 - le coordinate immagine ε, η e la quota Z .

Quindi per ogni punto immagine esistono infiniti punti oggetto tutti allineati lungo la retta che passa per P' e per O . Inoltre, ci si trova nel caso in cui sono scrivibili due equazioni con tre incognite (X, Y, Z) e quindi la ricostruzione tridimensionale non è possibile avendo a disposizione un solo fotogramma.

Per questi motivi le trasformazioni di cui sopra richiedono la conoscenza di altre variabili indipendenti:

- Parametri di orientamento interno (ε_0, η_0, c) forniti dal certificato di calibrazione della camera;
- Parametri di orientamento esterno ($X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa$) ricavabili dai punti di appoggio.

Ora riscriviamo le equazioni di collinearità, eq.2.19 ed eq.2.20, esplicitamente:

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \varepsilon_0 - c \frac{r_{11}(X - X_0) + r_{21}(Y - Y_0) + r_{31}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)} \\ \eta &= \eta_0 - c \frac{r_{12}(X - X_0) + r_{22}(Y - Y_0) + r_{32}(Z - Z_0)}{r_{13}(X - X_0) + r_{23}(Y - Y_0) + r_{33}(Z - Z_0)}\end{aligned}\quad (2.21)$$

per ottenere dalle coordinate terreno le coordinate immagine.

Mentre per ottenere le coordinate terreno a partire dalle coordinate immagine :

$$\begin{aligned}X &= X_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{11}(\varepsilon - \varepsilon_0) + r_{12}(\eta - \eta_0) - r_{13}c}{r_{31}(\varepsilon - \varepsilon_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c} \\ Y &= Y_0 + (Z - Z_0) \frac{r_{21}(\varepsilon - \varepsilon_0) + r_{22}(\eta - \eta_0) - r_{23}c}{r_{31}(\varepsilon - \varepsilon_0) + r_{32}(\eta - \eta_0) - r_{33}c}.\end{aligned}\quad (2.22)$$

2.5 La rotazione spaziale

I parametri r_{ik} sono gli elementi di una *matrice di rotazione spaziale*, determinata dagli angoli ω, φ, κ , che definisce l'orientazione del fotogramma rispetto agli assi X, Y, Z .

La rotazione spaziale può essere descritta in forma matriciale partendo dalla terna cartesiana X, Y, Z e la si può esplicitare in modo da portare gli assi di riferimento del terreno ad allinearsi con gli assi di riferimento del fotogramma come mostrato in Figura 2.12.

Noti gli angoli ω (rotazione attorno all'asse X), φ (rotazione attorno all'asse Y), κ (rotazione attorno all'asse Z), la rotazione $R_{\kappa\varphi\omega}$ genera la seguente trasformazione:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon \\ \eta \\ -c \end{bmatrix} = R_{\kappa\varphi\omega} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R_{\kappa} R_{\varphi} R_{\omega} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

che corrisponde al prodotto delle rotazioni attorno ai tre assi.

Nell'eq. 2.23 si può notare come la terza coordinata nel riferimento del fotogramma è $-c$ perché il piano del fotogramma è a tale distanza dal centro di proiezione che corrisponde all'origine degli assi.

Calcoliamo ora la matrice $R_{\kappa\varphi\omega}$ che descrive l'effetto della rotazione dal terreno al fotogramma:

- per la rotazione attorno a X si ha:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R_{\omega} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

- per la rotazione attorno a Y' si ha:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = R_{\varphi} \begin{bmatrix} X \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

- per la rotazione attorno a Z'' si ha:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon \\ \eta \\ -c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X'' \\ Y'' \\ Z'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \kappa & \sin \kappa & 0 \\ -\sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z'' \end{bmatrix} = R_{\kappa} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z'' \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Complessivamente dalle eq. 2.24, eq. 2.25, eq. 2.26 si ottiene:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon \\ \eta \\ -c \end{bmatrix} = R_{\kappa} R_{\varphi} R_{\omega} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}. \quad (2.27)$$

Ora per determinare la matrice complessiva di rotazione basterà moltiplicare le tre rotazioni lungo gli assi appena calcolate:

$$R_{\kappa\varphi\omega} = R_{\kappa} R_{\varphi} R_{\omega} = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \kappa & (\sin \omega \sin \varphi \cos \kappa + \cos \omega \sin \kappa) & (-\cos \kappa \sin \varphi \cos \omega + \sin \kappa \sin \omega) \\ -\cos \varphi \sin \kappa & (-\sin \omega \sin \varphi \sin \kappa + \cos \omega \cos \kappa) & (\sin \kappa \sin \varphi \cos \omega + \cos \kappa \sin \omega) \\ \sin \varphi & -\sin \omega \cos \varphi & \cos \varphi \cos \omega \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Analizzando l'eq. 2.28 e valutandone gli scarti medi lungo gli assi di riferimento si può dire che la precisione fotogrammetrica segue queste regole generali:

- per uno stesso rapporto di base, gli scarti quadratici medi delle tre coordinate sono direttamente proporzionali al fattore di scala del fotogramma, per cui una volta scelta opportunamente la scala si può ottenere qualsiasi precisione;
- fissata una scala, gli errori lungo Z sono inversamente proporzionali al rapporto di base; mentre gli errori in X, Y aumentano di poco al diminuire del rapporto;
- per una data base, gli errori in Z aumentano con il quadrato della distanza fra camera e oggetto.

Per le operazioni fotogrammetriche risulta più facile capirne e predirne il comportamento se si utilizzano gli angoli *azimuth*, *elevation*, *roll* che in bibliografia si possono trovare anche con denominazioni diverse senza che però il significato geometrico cambi sostanzialmente (Fig 2.13).

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.

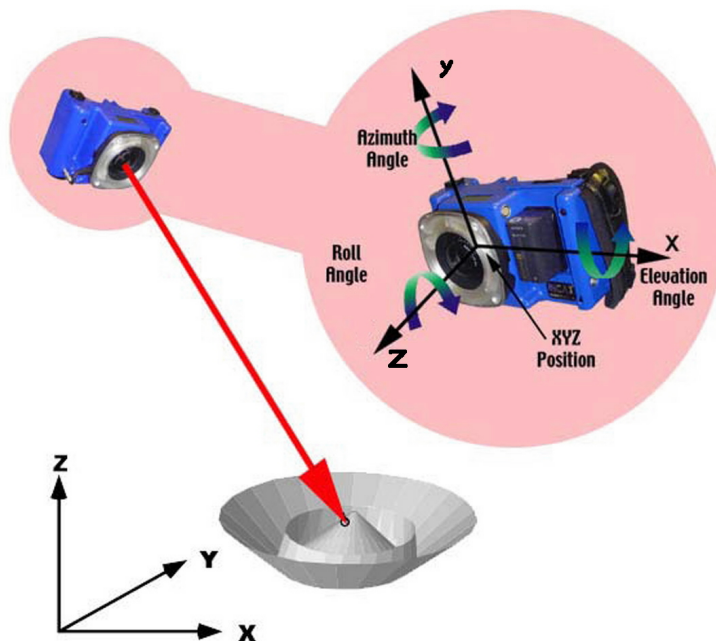


Figura 2.13: Angoli di azimuth, elevation e roll.

2.6 Orientamento Interno

Per definire l'orientamento interno di una camera fotogrammetrica occorre conoscere: distanza principale c , la posizione del punto principale di autocollimazione PP rispetto al centro fiduciale FC , mostrati in Figura 2.10, e il valore della distorsione radiale e tangenziale dell'obiettivo.

Per ricostruire il sistema di coordinate immagine il telaio della camera fotografica riporta *le marche fiduciali* in posizione fissa in base alle quali si definisce il *centro fiduciale* FC . Il centro generalmente non coincide con il punto di autocollimazione e le sue coordinate rispetto al sistema di assi del fotogramma sono x_0, y_0 .

L'obiettivo della macchina fotografica è un sistema ottico realizzato assemblando diversi tipi di lenti e per questo non si comporta come un sistema ottico ideale e produce aberrazioni dell'immagine.[5]

Se il sistema ottico fosse ideale esisterebbero due piani normali all'asse ottico, detti principali o nodali, e i raggi ottici si comporterebbero ignorando la distanza fra i piani stessi. L'intersezione di questi piani con l'asse ottico (OA) è data dai punti principali coincidenti con i punti nodali N e N' . Per definizione i raggi centrali passanti per N e N' formano lo stesso angolo τ sia nello spazio oggetto che nello spazio immagine; inoltre N e N' possono essere considerati centro di prospettiva nello spazio oggetto e nello spazio immagine come mostrato in Figura 2.14 .

Il sistema ottico reale in Figura 2.15 è più complesso ed è costituito da ottiche formate da obiettivi di notevole spessore le cui lenti sono ricavate da tipi differenti di vetro ottico in modo da correggere le aberrazioni il più possibile e il diaframma non si trova esattamente al centro dell'obiettivo. Per questi motivi la formazione dell'immagine nel sistema ottico reale può essere descritta dalla Figura 2.16.

Osservando la Figura 2.16 si nota che:

- l'asse ottico di riferimento, dopo l'assemblaggio delle singole lenti e il montaggio dell'obiettivo sulla camera, non è OA ma un asse determinato in seguito alla calibrazione, chiamato *raggio principale di autocollimazione PRA* che interseca il piano immagine nel *punto principale di autocollimazione PPA*;
- τ' non è uguale a τ , quindi è necessario definire il punto O'_M distante c da IP in modo da riprodurre gli angoli τ il più precisamente possibile;
- la distanza principale realizzata meccanicamente con l'assemblaggio della camera non coincide con la distanza principale ottica;

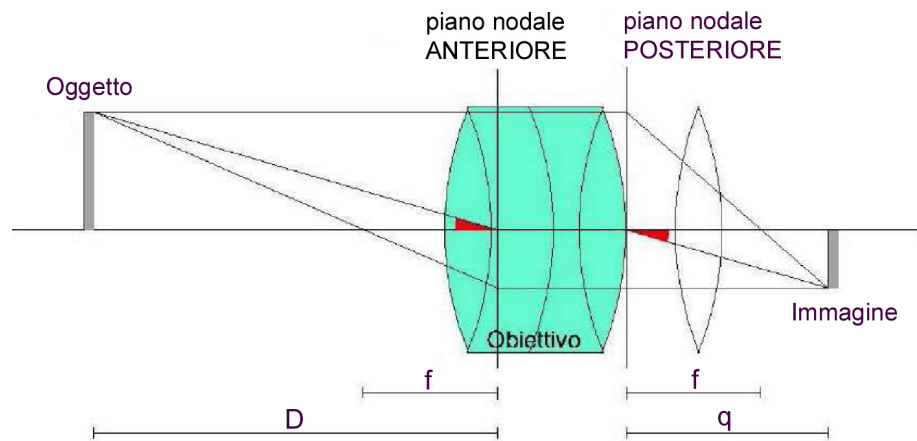


Figura 2.14: Sistema ottico ideale.

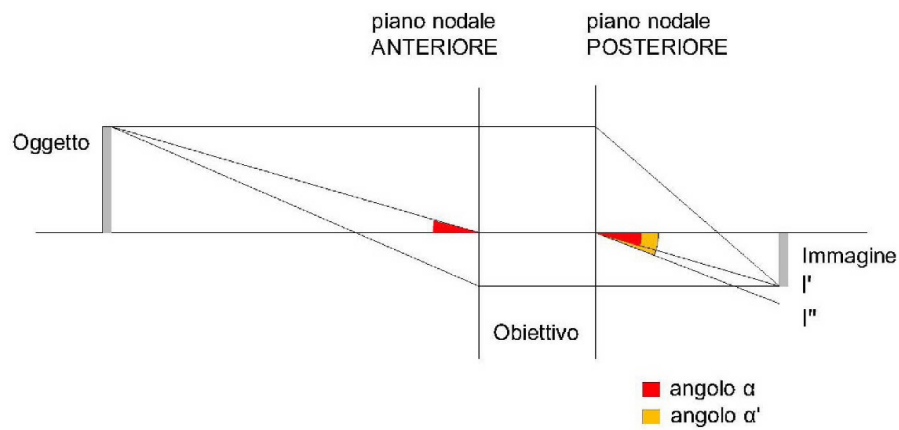


Figura 2.15: Sistema ottico reale.

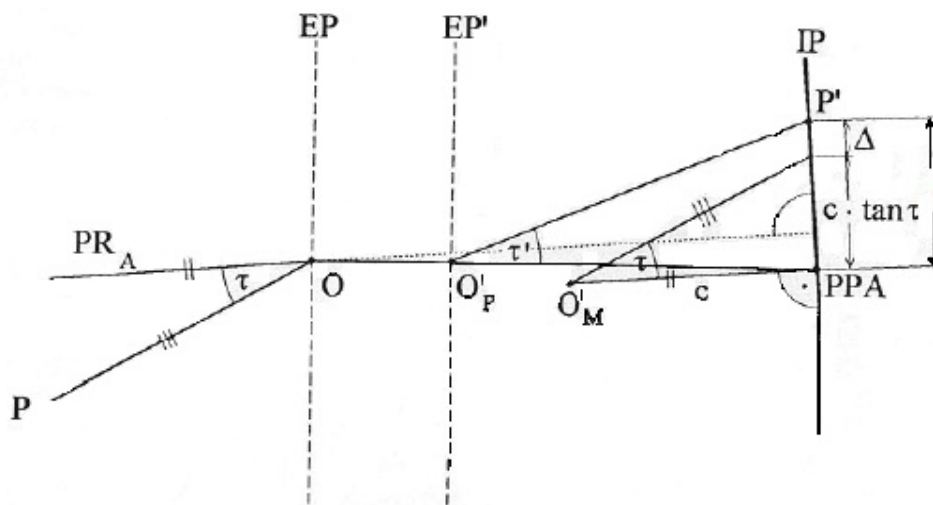


Figura 2.16: Formazione dell'immagine nel sistema ottico reale.

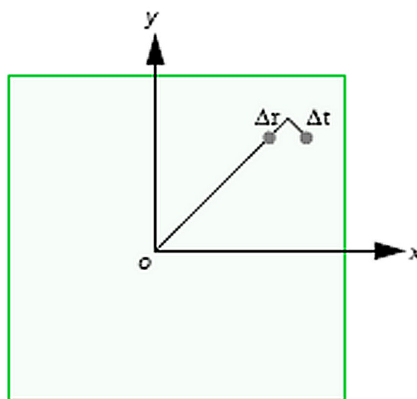


Figura 2.17: Distorsione radiale (Δr) e tangenziale (Δt) nelle lenti.

- IP e PR_A non sono perpendicolari all'asse ottico OA .

2.6.1 Abberazioni delle lenti

Le aberrazioni delle lenti non influenzano la qualità dell'immagine, ma hanno un significativo impatto sulla geometria dell'immagine e sulle misure fotogrammetriche da eseguire sull'immagine stessa. Queste distorsioni sono dovute all'assemblaggio delle lenti stesse e sono proprie di ogni obiettivo. Devono essere compensate poichè causano uno spostamento dell'immagine rispetto alla posizione che l'immagine avrebbe assunto se l'obiettivo fosse stato ideale. Di questo spostamento (Figura 2.17) viene considerata usualmente la sola componente radiale, la *distorsione radiale*.

Per distorsione radiale, Δr , si intende lo spostamento dei punti immagine, come ad esempio P' , lungo linee radiali dal punto principale PPA . Questa distorsione causa lo spostamento dei punti e, una volta nota, le coordinate immagine possono essere corrette.

Le curve di distorsione radiale vengono determinate in fase di calibrazione della camera e rappresentate dal seguente polinomio (eq. 2.29) funzione dei *coefficienti di distorsione radiale* ($\kappa_0, \kappa_1, \kappa_2$):

$$\Delta r = \kappa_0 r^1 + \kappa_1 r^3 + \kappa_2 r^5. \quad (2.29)$$

Δr è la distorsione radiale calcolata lungo la distanza radiale r dal punto principale.[10]

La distorsione radiale viene calcolata lungo le quattro semidiagonali del formato quadrato dell'immagine e le curve calcolate risultano non simmetriche. Per ridurre queste differenze si sceglie un altro asse ottico di riferimento tale che le differenze tra le curve vengano minimizzate. In base a questo nuovo asse ottico di riferimento saranno calcolati tutti i parametri di orientamento interno ($\varepsilon, \eta, O'_M, \kappa_0, \kappa_1, \kappa_2$).

La componente tangenziale, o *distorsione tangenziale* Δt , della distorsione deriva dall'imperfetto centramento delle lenti che compongono il sistema ottico. Questa provoca uno spostamento dell'immagine in direzione normale alla retta che congiunge il punto immagine con il punto di intersezione del piano immagine con l'asse ottico. Viene calcolata come angolo destro rispetto alle linee radiali e il suo effetto ai fini dell'analisi fotogrammetrica può considerarsi trascurabile. Per correggerla non esistono rimedi ottici o strumentali ma bisogna prevenirla in fase costruttiva in modo che il centramento degli obiettivi sia il più preciso possibile e il più costante nel tempo anche in ambienti termici differenti.

La distorsione radiale è normalmente un ordine di grandezza superiore della distorsione tangenziale.

2.6.2 Certificato di calibrazione

Questo certificato accompagna ogni macchina fotografica metrica ed è prodotto dalla casa costruttrice riportando:

- le coordinate immagine delle marche fiduciali;
- le coordiante immagine di PPA;

- il valore della distanza principale c ;
- la curva di distorsione radiale media;
- la data di calibrazione;
- altre informazioni sulla risoluzione dell'immagine.

Ovviamente se la camera fotografica è non metrica questi parametri vanno calcolati attraverso il processo di calibrazione della camera stessa.

2.7 Orientamento esterno

L'orientamento esterno definisce la posizione e le coordinate angolari della macchina fotografica che cattura un'immagine. La posizione viene definita dalle coordinate X_0, Y_0, Z_0 del centro di prospettiva O rispetto allo spazio oggetto di assi X, Y, Z . Gli elementi rotazionali, invece, descrivono il rapporto tra il sistema di coordinate nello spazio oggetto X, Y, Z rispetto allo spazio immagine x, y, z attraverso la definizione dei 3 angoli di rotazione ω, φ, κ .

Questo procedimento permette di mettere in relazione i due sistemi di riferimento descrivendo la posizione della macchina fotografica nello spazio oggetto.

Questi 6 parametri incogniti, mostrati in Figura 2.18, vanno determinati per ogni fotogramma e sono necessari per la soluzione delle equazioni di collinearità.[9]

Nel caso si lavori con solo due fotogrammi, come nel caso dell' utilizzo stereoscopico, per risolvere il problema si necessita di *punti d'appoggio* e si possono scegliere metodi di lavoro distinti:

- orientamento indipendente di ciascun fotogramma;
- orientamento simultaneo dei due fotogrammi.

2.7.1 Orientamento esterno di un singolo fotogramma (space resection)

Questa tecnica viene utilizzata su un fotogramma alla volta per determinare i parametri di orientamento esterno (6 incognite) avvalendosi di GCP (**Ground control point**) conosciuti e dei parametri di orientamento interno stimati in precedenza.

Per ogni P_i si possono scrivere due equazioni di collinearità, del tipo della eq. 2.19, dove le incognite sono proprio $X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa$.

Avendo a disposizione 3 punti d'appoggio si possono scrivere 6 equazioni (eq. 2.30) e risolvere il sistema:

$$\begin{array}{ll} P_1 = (X_1, Y_1, Z_1) & P'_1 = (x_1, y_1) \\ P_2 = (X_2, Y_2, Z_2) & P'_2 = (x_2, y_2) \\ P_3 = (X_3, Y_3, Z_3) & P'_3 = (x_3, y_3) \end{array} \quad (2.30)$$

In realtà la procedura può essere risolta solo in modo analitico attraverso la linearizzazione necessitando quindi dei valori approssimati delle incognite.

In modo analogo si lavora sul secondo fotogramma, ottenendo alla fine 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 avranno 3 nuove incognite e 4 nuove equazioni del tipo della eq. 2.21. Si ottengono, così, sistemi sovradeterminati che, risolti col metodo dei minimi quadrati dopo opportuna linearizzazione, forniscono le incognite relative alla posizione dei punti di presa e alle rotazioni, nonché le 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.

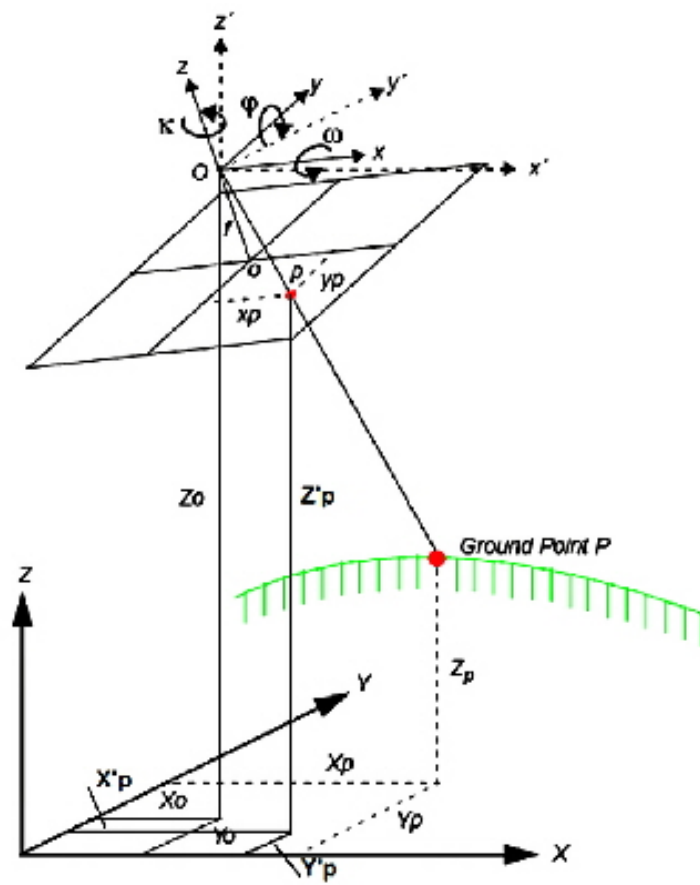


Figura 2.18: Parametri di orientamento esterno.

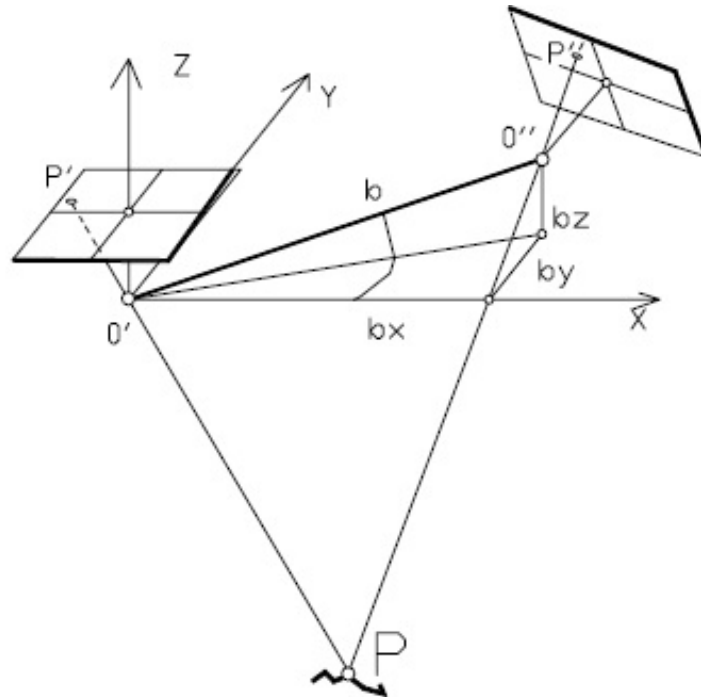


Figura 2.19: Orientamento relativo asimmetrico.

2.7.2 Orientamento combinato di una coppia di immagini

Si lavora sulla coppia stereoscopica di fotogrammi e si deve risolvere contemporaneamente il sistema sia per i 12 parametri incogniti (6 per ogni fotogramma) che per le coordinate dei punti terreno incogniti.

Per ogni punto d'appoggio si possono scrivere quattro equazioni di collinearità (2 per fotogramma) contenenti le 12 incognite:

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{i1} &= f(\varepsilon_0, c, X_{01}, Y_{01}, Z_{01}, \omega_1, \varphi_1, \kappa_1, X_i, Y_i, Z_i) \\
 \eta_{i1} &= f(\eta_0, c, X_{01}, Y_{01}, Z_{01}, \omega_1, \varphi_1, \kappa_1, X_i, Y_i, Z_i) \\
 \varepsilon_{i2} &= f(\varepsilon_0, c, X_{02}, Y_{02}, Z_{02}, \omega_2, \varphi_2, \kappa_2, X_i, Y_i, Z_i) \\
 \eta_{i2} &= f(\eta_0, c, X_{02}, Y_{02}, Z_{02}, \omega_2, \varphi_2, \kappa_2, X_i, Y_i, Z_i)
 \end{aligned} \tag{2.31}$$

Per ogni punto incognito inoltre si possono aggiungere 4 equazioni che contengono ulteriori tre incognite.

Quello che si ottiene è un sistema rindondante da linearizzare e risolvere per stima ai minimi quadrati, ottenendo i 12 parametri incogniti e le coordinate terreno di tutti i punti incogniti.

La procedura d'orientamento si divide in due fasi:

Fase 1: Orientamento relativo dove avviene la formazione del modello stereoscopico in un arbitrario sistema di coordinate tridimensionale (x^*, y^*, z^*) ;

Fase 2: Orientamento assoluto dove le coordinate del modello vengono trasferite nel sistema di coordinate del terreno (X, Y, Z) .

Orientamento relativo

Per l'orientamento relativo non occorrono punti d'appoggio. 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^*) .

Una condizione necessaria per l'orientamento relativo, è che i raggi omologhi si intersechino da almeno 5 punti ben distribuiti della superficie, se questo è vero allora tutte le altre coppie di raggi omologhi si intersecheranno. Prende il nome di orientamento relativo proprio perché vengono determinate soltanto le posizioni e le orientazioni relative di 2 fasci di raggi.[4]

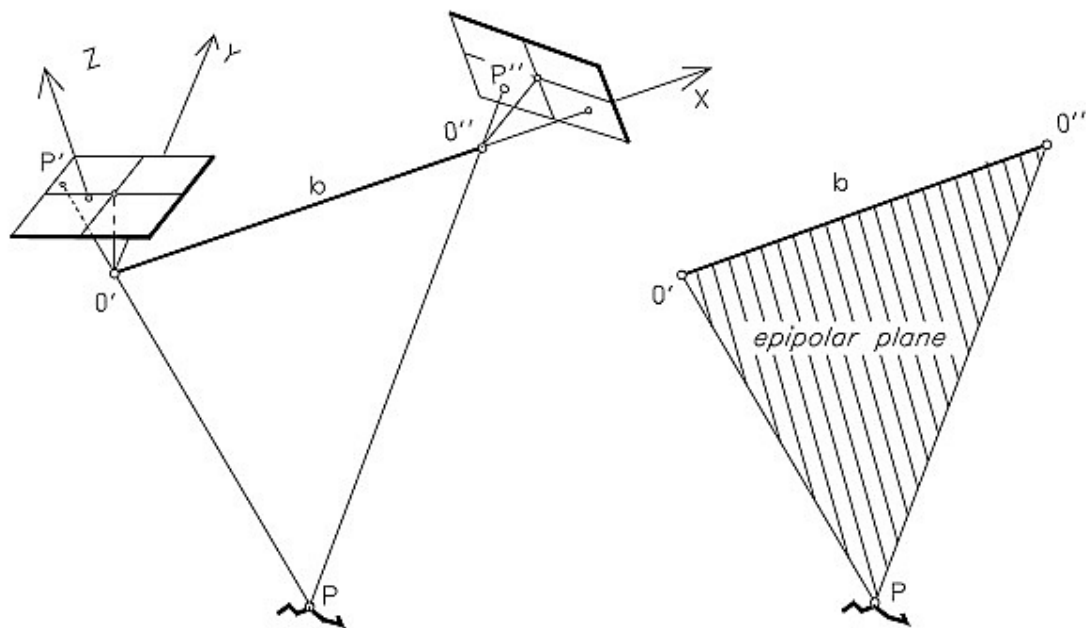


Figura 2.20: Orientamento relativo simmetrico.

L'orientamento relativo può essere simmetrico o asimmetrico in base a come viene fissato il sistema di riferimento:

- *Asimmetrico* (Figura 2.19). Se si sceglie di fissare un sistema di riferimento relativo con origine nel primo centro di proiezione i 3 parametri di traslazione sono annullati. Inoltre si può fissare il sistema parallelo al sistema lastra e così vengono posti uguali a zero le rotazioni. Così sono da calcolare solo le coordinate del secondo centro di presa (che sono le componenti della base di presa, o meglio i due rapporti di due componenti alla terza la quale determina la scala del modello) e le tre rotazioni del secondo fascio;
- *Simmetrico* (Figura 2.20). Quando si fissa l'origine del sistema di riferimento nel primo centro di proiezione e con asse x passante per il secondo centro di proiezione, si annullano le due componenti di traslazione del secondo centro di proiezione. Resta la possibilità di ruotare il sistema di riferimento per annullare una rotazione. I parametri incogniti sono in questo caso, due rotazione per un fascio e le altre tre rotazioni dell'altro fascio.

Il motivo per cui si possono risolvere solo 5 equazioni di complanarità è dato dal fatto che l'equazione di complanarità è insensibile a:

- variazioni di scala;
- traslazione rigida;
- rotazione rigida.

Questi 7 parametri vanno ricavati nella successiva fase di orientamento assoluto.

Per la determinazione dei parametri si considera il fatto che il tetraedro costituito dai due raggi proiettivi omologhi r_1, r_2 e la base di presa b deve essere nullo ossia che i vettori r_1, r_2 e b devono essere complanari.

Si fissa un sistema ausiliario di coordinate con origine nel primo centro di proiezione ed asse z rivolto verso l'alto. L'asse x è disposto circa secondo la direzione della base di presa. La distanza tra due raggi proiettivi omologhi, misurata su di un piano parallelo al piano XY , viene definita *parallasse* (Figura 2.21). Essa viene distinta in due componenti: px , parallela alla base di presa, e py , ad essa perpendicolare. Esse sono espresse in funzione delle coordinate lastra. La parallasse varia al variare del piano su cui essa viene

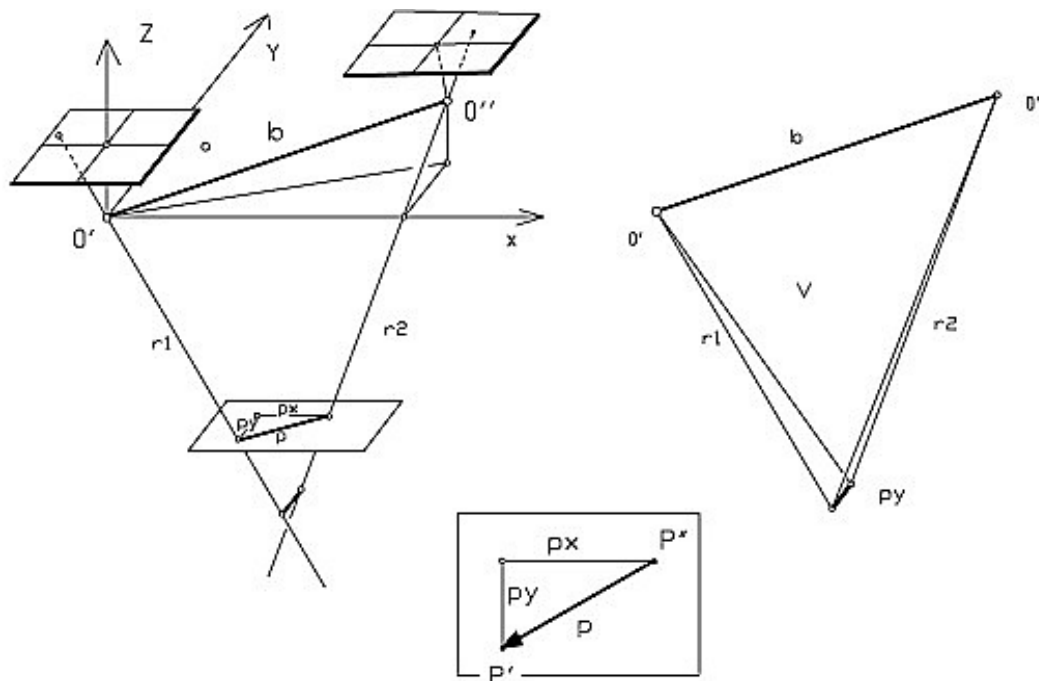


Figura 2.21: Parallasse.

misurata, fino a raggiungere un valore minimo. Se i due raggi omologhi sono complanari, questo valore minimo è pari a zero (i due 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.

La condizione di complanarità si può così esprimere:

$$b^T (r_1 \times r_2) = 0 \tag{2.32}$$

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

Una volta stimati i parametri di orientamento relativo si possono calcolare le coordinate modello con le equazioni di collinearità.

Questo metodo di calcolo dei parametri di orientamento esterno, se utilizzato su più immagini, risulta essere un metodo limitativo e viene utilizzato solo come passaggio preliminare per i calcoli successivi.

La determinazione contemporanea dei parametri di orientamento di un blocco di fotogrammi è uno dei problemi pratici più importanti sia della fotogrammetria aerea che di quella terrestre. La procedura più utilizzata per determinare i parametri sia interni che esterni è la *compensazione del blocco di fotogrammi a stelle proiettive*, meglio nota come "bundle adjustment". Questo metodo consente la determinazione dei parametri dell'orientamento, attraverso l'uso di limitati punti noti, dislocati opportunamente nel blocco di fotogrammi. I punti sono quelli necessari per determinare, con opportune misure e algoritmi di calcolo, le tre coordinate dei centri di presa, le tre rotazioni del fotogramma, le coordinate di punti su ciascun fotogramma che saranno poi utilizzati per procedere alla restituzione del modello. Naturalmente anche i parametri dell'orientamento interno, quando non noti.

Orientamento assoluto

La trasformazione (Figura 2.22) che permette di rapportare le coordinate del modello (x^*, y^*, z^*) e le coordinate terreno (X, Y, Z) è una trasformazione conforme nello spazio o meglio una rototraslazione con variazione di scala esprimibile attraverso l'equazione:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_0^* \\ Y_0^* \\ Z_0^* \end{pmatrix} + m [M] \begin{pmatrix} x^* \\ y^* \\ z^* \end{pmatrix} \tag{2.33}$$

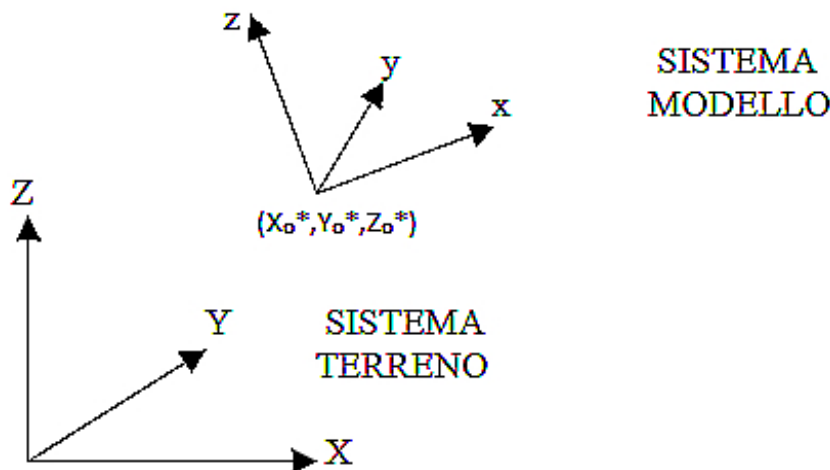


Figura 2.22: Orientamento assoluto.

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 $(R_{\omega\varphi\kappa})$.

Per definire la trasformazione vanno determinati i 7 parametri $X_0^*, Y_0^*, Z_0^*, \omega, \varphi, \kappa, m$, detti *elementi di orientamento assoluto*. Per ricavare questi parametri è necessario ricorrere all'uso di punti di appoggio per formare almeno 7 equazioni tenendo conto che:

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

Quindi se si hanno ad esempio due punti d'appoggio completi e un punto di cui si conosce la sola quota, questi bastano per risolvere algebricamente il sistema. Se si conoscono più punti di appoggio il sistema risulta sovradeterminato e si può procedere alla stima ai minimi quadrati.

2.8 Bundle Block Adjustment

È un procedimento di triangolazione aerea che basa la sua elaborazione sul fatto che il punto di presa e i punti immagine di ciascun fotogramma definiscono una stella di raggi nello spazio (Figura 2.23). I parametri di orientamento esterno, di tutte le stelle del blocco di fotogrammi, vengono processati in un'unica soluzione attraverso una tecnica ai minimi quadrati di minimizzazione e redistribuzione dell'errore. Per applicare questo metodo è necessario avere, come dati di partenza, le coordinate immagine dei punti legame (punti presenti su più di un fotogramma) e le coordinate immagine e terreno dei punti d'appoggio. Quindi si hanno come incognite i 6 parametri di orientamento esterno per ogni immagine e le 3 coordinate incognite dei tie points e dei control points utilizzati.

Il metodo richiede un buon restitutore in grado di elaborare grandi quantità di dati ed essendo un problema tridimensionale bisogna tenere conto che non si possono effettuare separatamente compensazioni planimetriche e di quota. È comunque un metodo preciso che si basa sulla relazione diretta tra le coordinate immagine e terreno e permette l'utilizzo delle tecniche di eliminazione degli errori sistematici. Grazie al suo uso è possibile aggiungere informazioni già note prima del procedimento ed infine ricavare i parametri di orientamento esterno rendendoli utilizzabili dagli strumenti di restituzione. Nella fotogrammetria condotta con camere non metriche resta, per ora, il miglior metodo per ottenere risultati accettabili.

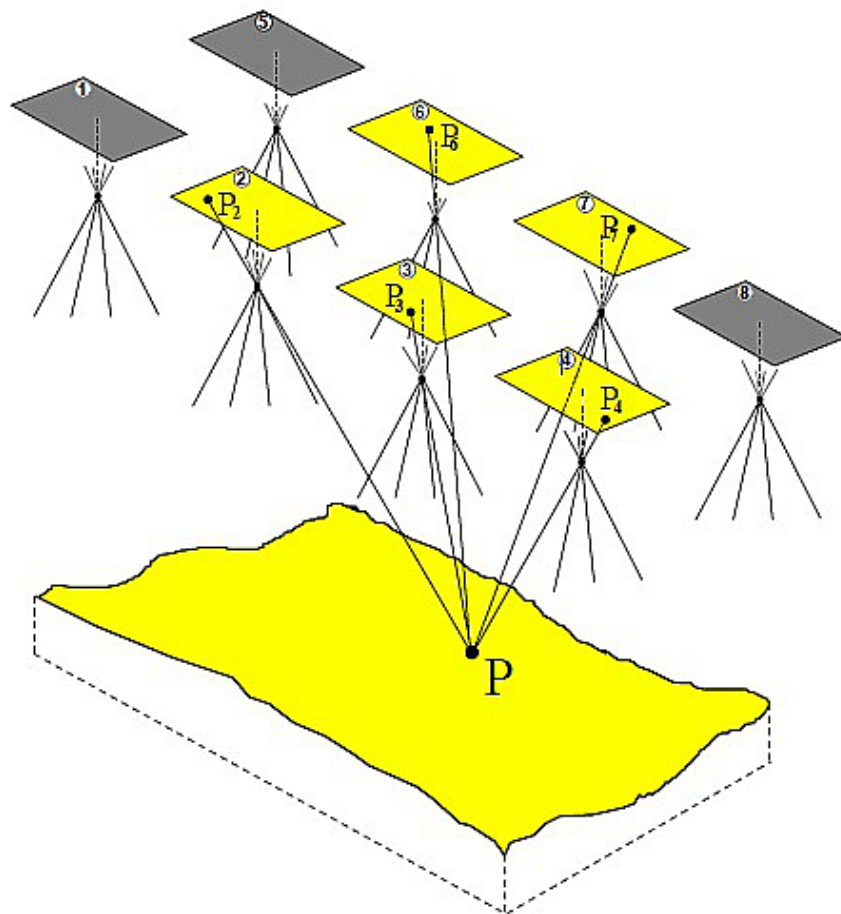


Figura 2.23: Metodo delle stelle proiettive.

Le stelle proiettive vengono traslate (X_0, Y_0, Z_0) e ruotate $(\omega, \varphi, \kappa)$ in modo che i raggi si intersechino al meglio in corrispondenza dei tie points e passino il più possibile per i punti di appoggio.

Le relazioni matematiche che intercorrono fra coordinate immagine e coordinate oggetto si basano sulle equazioni di collinearità sopra descritte. Occorre conoscere comunque i valori approssimati dei parametri di orientamento, coordinate e rotazioni dei centri di presa e le coordinate dei punti noti. Inoltre si possono aggiungere come incognite anche i parametri dell'orientamento interno e questo non influisce sul sistema poiché questo è fortemente rindondante.

2.8.1 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 e, allo stesso tempo, minimizzare 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:

$$V = AP - L \quad (2.34)$$

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;

Q = 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 Q contiene le correzioni ai parametri di orientamento esterno ed è calcolata nel modo seguente:

$$Q = (A^t P A)^{-1} A^t P L \quad (2.35)$$

Nell'equazione 2.35 P è la matrice contenente i pesi attribuiti alle 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. Indicano 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.

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

L'utilizzo sempre più spinto di camere digitali non metriche in fotogrammetria, ha 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 [11]. 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.

La procedura si basa sulla soluzione di un calcolo di bundle-adjustment eseguito considerando come incognite i sei parametri di orientamento esterno delle immagini e i sei parametri di calibrazione della camera ($c, x_p, y_p, k_1, k_2, k_3$). Note le coordinate oggetto di un certo numero di punti è possibile risolvere il calcolo di bundle-adjustment. La calibrazione si basa sulla determinazione dei parametri di orientamento e di distorsione contestualmente alla fase di rilievo fotogrammetrico utilizzando simultaneamente le prese fotografiche dell'oggetto e punti di coordinate note. La possibilità di determinare i parametri di calibrazione specifici per ogni rilievo risulta vantaggiosa soprattutto quando si utilizzano camere fotografiche non metriche che presentano una scarsa stabilità dei parametri di calibrazione. 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.

Il modello di collinearità usato nelle applicazioni di laboratorio è 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].

Questi parametri 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);
- i parametri della distorsione tangenziale della lente (p_1, p_2).

Risolvere un Bundle adjustment con Self – Calibration significa stimare i parametri addizionali nelle equazioni 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.

2.9.1 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. 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

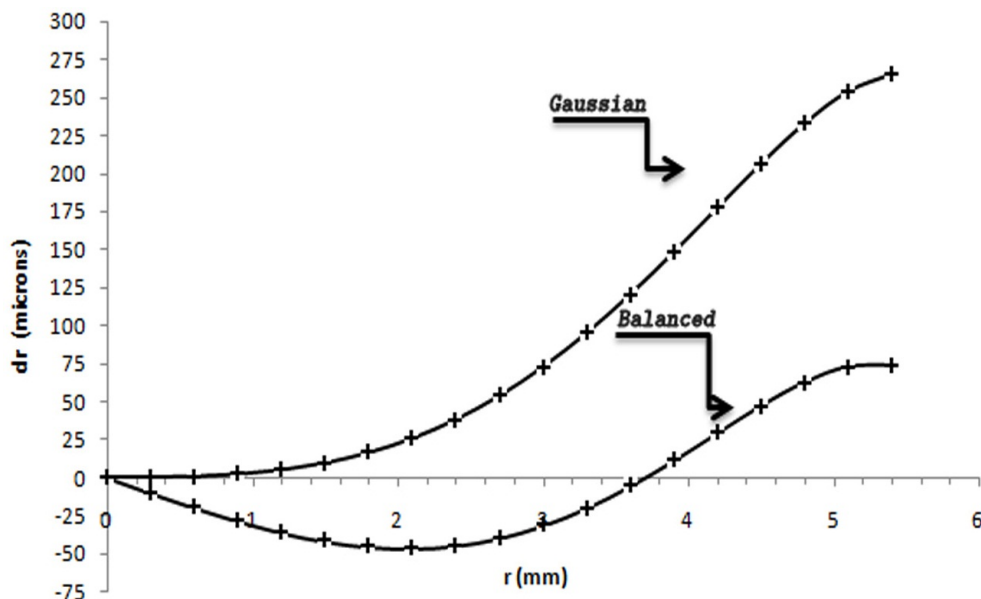


Figura 2.24: Profilo di distorsione radiale dal punto principale al bordo della CCD.

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.

2.9.2 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.

I 3 parametri addizionali (k_0, k_1, k_2) utilizzati per modellare la distorsione radiale dr sono generalmente espressi dal polinomio di ordine dispari nelle eq. 2.29. I coefficienti k_i sono generalmente altamente correlati, con l'errore più grande addebitabile al termine cubico.

I parametri P_1 e P_2 (eq. 2.36) sono fortemente legati a x_p e y_p .

$$P(r) = \left[(P_1)^2 + (P_2)^2 \right]^{\frac{1}{2}} r^2 \quad (2.36)$$

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 [11].

La curva di distorsione radiale standard (Gaussiana), si basa sull'eq. 2.29, come mostrato in Figura 2.24.

Lo step successivo è quello di livellare e bilanciare la curva eguagliando i valori di massima e minima distorsione (Figura 2.25).

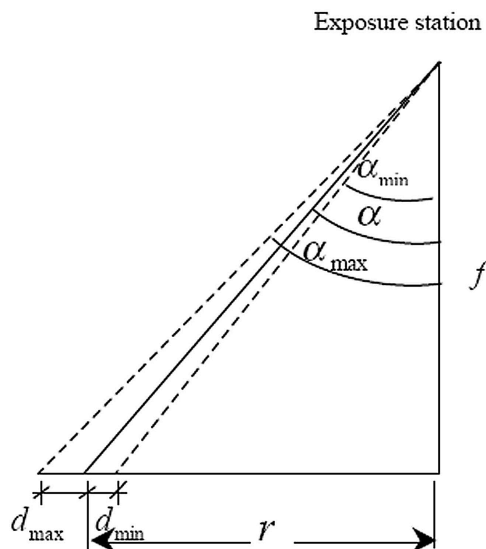


Figura 2.25: Bilanciamento della curva di distorsione.

Questa procedura è fatta soltanto per bilanciare le escursioni positive e negative della funzione di distorsione attorno a 0. Questo passaggio non ha effetto sui risultati finali delle coordinate corrette. È soltanto una pratica professionale accettata. Matematicamente, il bilanciamento della curva induce ad un cambiamento nei parametri. Ad esempio per il valore della focale vale la relazione:

$$r_{\max} - c_b \tan(\alpha_{\max}) + r_{\min} - c_b \tan(\alpha_{\min}) = 0 \quad (2.37)$$

e la nuova lunghezza focale sarà quindi (eq.2.38),

$$c_b = \frac{r_{\max} + r_{\min}}{\tan(\alpha_{\max}) - \tan(\alpha_{\min})}. \quad (2.38)$$

Una volta fissata la nuova lunghezza focale, il programma procede con il calcolo aggiustando anche gli altri parametri k_1, k_2, k_3 al fine di produrre la curva bilanciata [12].

Il bilanciamento viene ottenuto attraverso l'introduzione di un termine lineare all'eq. 2.29 ed un conseguente cambiamento Δc . In diverse circostanze il profilo di distorsione radiale, per le parti centrali della CCD, non si discosta dalla funzione lineare $\Delta r = k_0 r$. È importante notare che, nell'applicazione delle equazioni di collinearità, questi 2 profili di distorsione sono equivalenti [11]. Il risultato netto del processo di calibrazione è che, per la lunghezza focale calibrata, le lenti non mostrano distorsione radiale significativa.

2.10 Tipi di Fotogrammetria

Si possono distinguere nel campo della fotogrammetria due metodologie distinte:

- la *fotogrammetria monoscopica* che consiste nel raddrizzamento di singoli fotogrammi da cui si ricava una proiezione ortogonale di tipo bidimensionale, parallela alla superficie inquadrata;
- la *fotogrammetria stereoscopica* nella quale il medesimo oggetto viene fotografato da due punti differenti in modo da ricavarne una visione tridimensionale. Ciò consente di collocare l'oggetto all'interno di un sistema geometrico di coordinate spaziali x, y, z e di apprezzare pertanto anche i valori di quota delle sue varie parti, cioè le distanze dall'obiettivo della fotocamera.

Nell'ambito di questa disciplina si distinguono, inoltre, due fondamentali settori di applicazione che richiedono, in particolar modo per quanto riguarda la fase di acquisizione delle immagini, differenti attrezzature, metodologie e competenze:

- la *fotogrammetria aerea* contempla la documentazione del territorio e l'acquisizione delle immagini avviene per mezzo di camere installate su aeromobili;
- la *fotogrammetria terrestre* utilizza camere posizionate a terra e gli oggetti inquadrati sono parti di edifici o elementi naturali.

2.10.1 Fotogrammetria aerea

Le fotografie aeree

Le fotografie aeree, o fotogrammi, che vengono utilizzate per la produzione di cartografia devono presentare requisiti ben precisi che dipendono dalle caratteristiche geometriche delle camere e dalla metodologia della ripresa.

La camera fotogrammetrica

La camera fotogrammetrica utilizzata per le riprese è una camera fotografica molto complessa e di notevoli dimensioni e peso.

Le sue caratteristiche sono:

- il formato dell'immagine, di forma quadrata, ha il lato di 230 mm e quindi la sua area è sessanta volte maggiore di quella del negativo che si ottiene con una comune macchina fotografica amatoriale di formato (24 x 36) mmq;
- la macchina è dotata di un grande magazzino porta pellicola, che può contenere pellicole lunghe sino a 250 piedi (circa 80 m), e di dispositivi che consentono un'elevata automazione delle operazioni di ripresa;
- le immagini che da essa si ottengono sono metricamente corrette perché la distorsione dell'obbiettivo è praticamente nulla;
- la camera possiede dei riferimenti geometrici intrinseci alla sua struttura che materializzano un sistema di riferimento rispetto al quale è possibile definire la posizione dei punti immagine in termine di coordinate cartesiane;
- poiché la quota di volo di un aereo che esegue riprese fotogrammetriche è, come minimo, di alcune centinaia di metri, il terreno è sempre molto lontano dalla camera da presa (a distanza iperfocale); essa è quindi a fuoco fisso e la sua focale varia dai 150 mm sino ai 220- 300 mm ([3]).

La geometria interna può essere schematizzata come in Figura 2.26, nella quale notiamo che:

- esiste un centro dell'obbiettivo O , che assumeremo come punto di simmetria tra stella di raggi oggetto (cioè quelli che vengono riflessi dal terreno e colpiscono l'obbiettivo) e stella di raggi immagine (cioè quelli che, dopo aver attraversato l'obbiettivo, vanno a impressionare la pellicola);
- esiste un asse ottico dell'obbiettivo che è costituito dalla retta su cui giacciono i centri di tutte le calotte sferiche che delimitano la forma di tutte le lenti semplici da cui l'obbiettivo è formato;
- l'asse ottico dell'obbiettivo è ortogonale al piano su cui giace la pellicola da impressionare, piano che a sua volta coincide con il piano focale della camera da presa;
- l'obbiettivo ha una focale f che assumiamo essere la distanza del centro dell'obbiettivo dal piano focale;
- la distanza p del piano della pellicola dal centro dell'obbiettivo è detta distanza principale. Poiché la camera da presa è a fuoco fisso, la distanza principale ha un valore costante, coincidente con quello della distanza focale f ;
- l'angolo α formato tra un raggio che proviene da un punto P dello spazio oggetto e l'asse ottico, è uguale a quello α' formato dal raggio immagine e dall'asse ottico, il che significa che assumeremo l'obbiettivo come esente da qualsiasi tipo di distorsione.

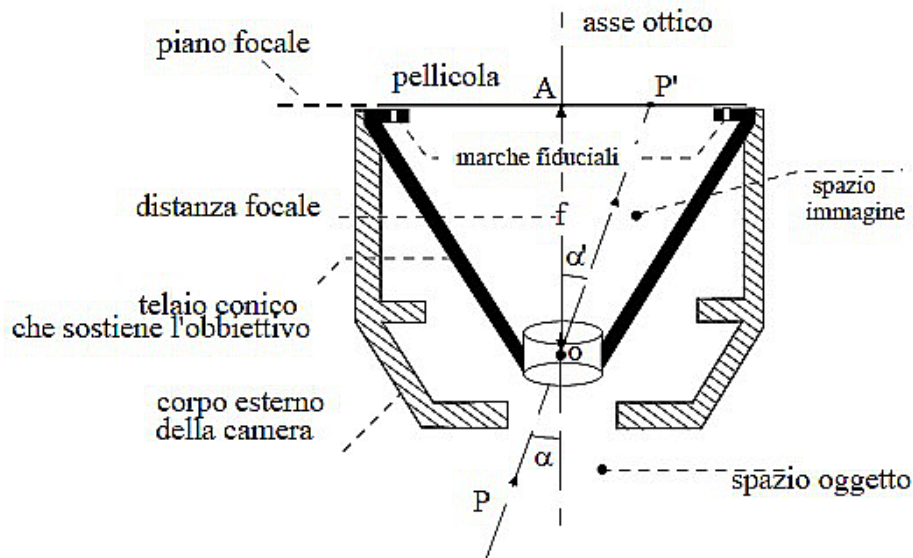


Figura 2.26: Schematizzazione della camera fotogrammetrica.

All'interno della base quadrata del tronco di cono che sostiene l'obiettivo, si trova una cornice, che serve d'appoggio alla pellicola; su tale cornice vi trovano quattro forellini; al momento della presa della fotografia la luce passa attraverso i quattro forellini, che quindi appariranno come quattro piccoli puntini bianchi su fondo nero, sulla diapositiva ottenuta sviluppando il negativo. Il diametro dei puntini è di qualche decimo di millimetro. Questi forellini (e anche le loro immagini sui fotogrammi) sono detti marche fiduciali e servono a materializzare un sistema cartesiano piano (x,y) , detto sistema di riferimento interno della camera da presa.

Nelle camere da presa le marche possono trovarsi in posizione mediana dei quattro lati del telaio su cui si appoggia la pellicola, oppure in corrispondenza degli angoli del telaio, o in entrambi le posizioni contemporaneamente, e in tal caso se ne avranno otto.

I fotogrammi

L'immagine del terreno ripresa nel fotogramma ha una scala media che dipende dalla distanza principale della camera da presa e dalla quota di volo.

Detta Q la quota di volo dell'aereo rispetto al livello del mare e qm la quota media del terreno sul livello del mare, si chiama altezza di volo e si indica con H la differenza:

$$H = Q - qm \quad (2.39)$$

Si parla di scala media di un fotogramma e non semplicemente di scala poiché la scala alla quale il terreno è rappresentato può variare all'interno di un unico fotogramma.

Questo dipende dal fatto che una porzione di terreno ripresa su un fotogramma può comprendere sia una valle che i fianchi delle montagne che la delimitano. Il fondo valle (la zona di terreno più lontana dall'obiettivo della macchina da presa) avrà una scala più piccola delle creste dei monti che delimitano la valle, le quali, trovandosi a quota maggiore, saranno più vicine all'obiettivo della camera da presa e saranno pertanto a scala maggiore.

Le informazioni che vengono registrate all'atto della presa sul fotogramma, oltre alle marche fiduciali, sono:

- un numero progressivo di contatore, utile per ricostruire la sequenzialità dei fotogrammi. Infatti mentre il negativo viene conservato in rotolo, le diapositive, o le stampe su carta, vengono stampate singolarmente nel formato $240 \text{ mm} \cdot 240 \text{ mm}$;
- l'immagine di un altimetro indicante con un margine di errore di $\pm 100 \text{ m}$, la quota assoluta di volo dell'aereo, da cui si può ricavare una buona stima della scala media del fotogramma;

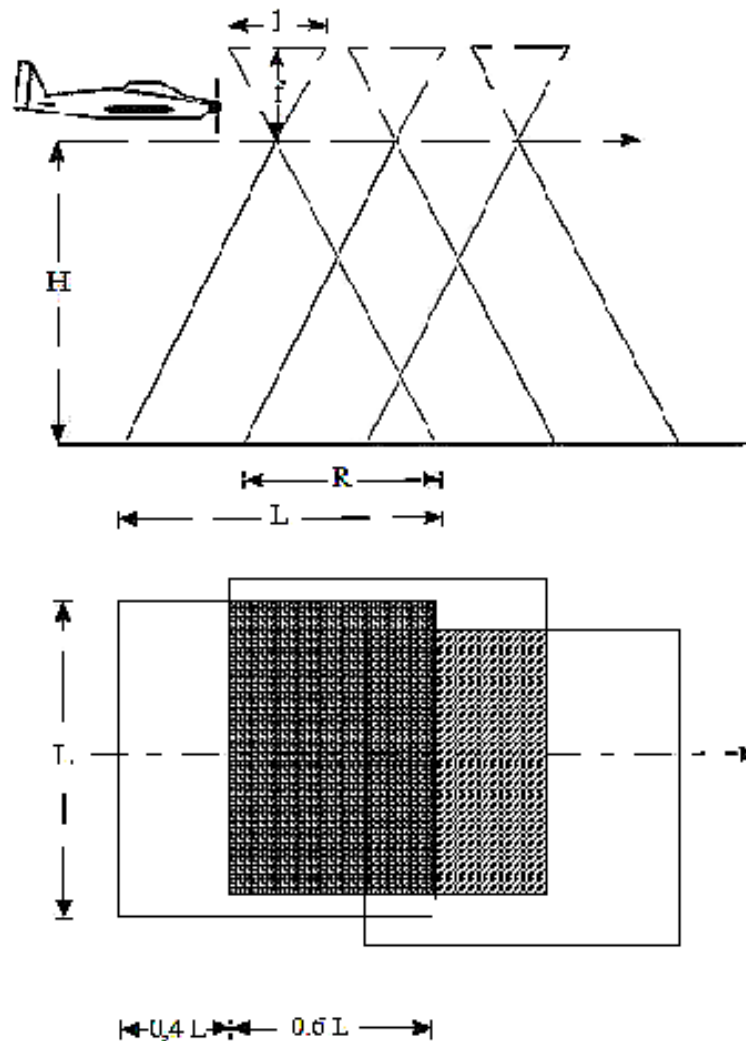


Figura 2.27: Schema di presa lungo la direzione di volo.

- un datario, cioè una finestrella con la data in cui il fotogramma è stato ripreso;
- l'immagine di un orologio indicante l'ora in cui il fotogramma è stato ripreso. L'ora è sempre quella solare, anche quando si è in regime di ora legale;
- l'immagine di una livella sferica, che permette di giudicare se l'aereo al momento della ripresa del fotogramma avesse un assetto regolare di volo;
- il valore della distanza principale della camera fotogrammetrica.

Schema di ripresa fotogrammetrica

L'aereo sorvola il terreno ad una quota relativa H e la ripresa delle fotografie del terreno devono avvenire in modo che tutta la superficie da cartografare sia scomposta in modelli stereoscopici (ogni punto del terreno deve comparire su due fotogrammi, Figura 2.27).

Questo è ottenibile sorvolando il terreno ed eseguendo delle riprese lungo allineamenti prefissati in sede di piano di volo. I fotogrammi ripresi lungo un medesimo allineamento formano una strisciata di fotogrammi. La linea mediana di una strisciata prende il nome di asse della strisciata. L'insieme delle strisciate che ricoprono il territorio da cartografare prende il nome di blocco di strisciate.

L'aereo sorvola il terreno eseguendo delle strisciate di fotogrammi secondo lo schema in Figura 2.28.

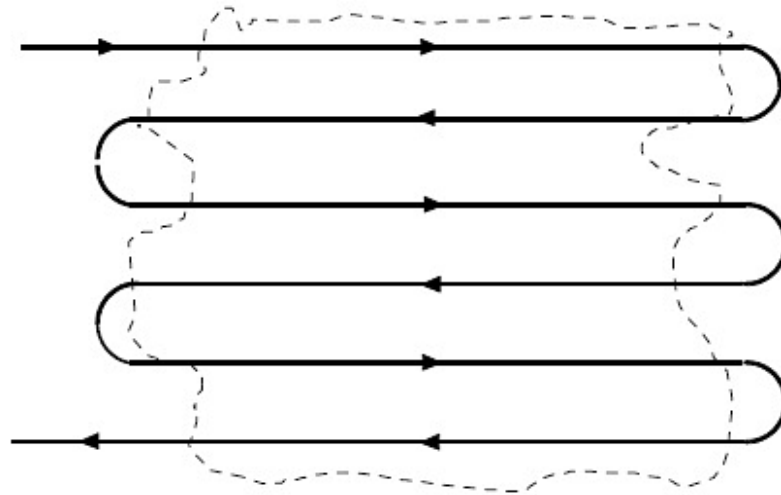


Figura 2.28: Schema di presa lungo la direzione di volo.

L'interasse tra due strisciate viene scelto in modo che il ricoprimento trasversale r abbia un valore compreso tra il 10% e il 20% di L , per garantire la totale copertura fotografica del terreno da cartografare.

I valori di ricoprimento sia longitudinale che trasversale vengono presi più abbondanti quando il territorio da cartografare non è pianeggiante; infatti in presenza di terreni collinari o montuosi può verificarsi che ci siano zone del territorio non riprese su due fotogrammi consecutivi, o che manchi la sovrapposizione tra strisciate adiacenti.

Supponiamo che la zona da rilevare sia l'area contornata in figura dalla linea tratteggiata. Il percorso dell'aereo sarà quello indicato dalla linea continua. I tratti rettilinei all'interno della zona da rilevare costituiscono gli assi delle strisciate.

Influenza delle condizioni meteorologiche sulle prese aeree

In un intero anno solare il numero di giornate utili a riprese fotografiche aeree per la costruzione di cartografia di base è limitato dalle condizioni meteorologiche e dai periodi stagionali.

Per l'esecuzione di una ripresa aerofotogrammetrica è necessaria infatti:

- l'assenza di nubi, che creano zone cieche se al di sotto della quota di volo, oppure di ombra se al di sopra;
- l'assenza di foschia, che impedisce la navigazione a vista e provoca un decadimento non tollerabile nella qualità dell'immagine fotografica;
- l'assenza di vento forte, che non permette di mantenere l'aereo in assetto di volo regolare;
- un'inclinazione sull'orizzonte dei raggi del sole non inferiore ai 30° . Un'inclinazione inferiore provoca ombre troppo lunghe e troppo intense che ostacolano la corretta interpretazione dei fotogrammi.

Occorre inoltre scartare, per le zone in pianura, il periodo estivo, nel quale la vegetazione è molto sviluppata e copre molti particolari del terreno, e, per quelle di montagna, il periodo dell'innevamento.

2.10.2 Fotogrammetria terrestre

Le fotografie terrestri, o fotogrammi, che vengono utilizzate per la produzione di composizioni architettoniche o di elementi di natura, devono presentare requisiti ben precisi che dipendono dalle caratteristiche geometriche delle camere e dalla metodologia della ripresa.

La camera fotogrammetrica è simile a quella utilizzata per la fotografia aerea anche se per motivi pratici deve risultare più leggera per facilitarne l'uso da parte dell'operatore. Di solito si utilizzano camere metriche in coppia montate su un'asta orizzontale collegata allo stesso cavalletto, in quanto devono essere

tra loro parallele e al contempo ortogonali all'oggetto da fotografare. I due fotogrammi devono avere una sovrapposizione pari almeno al 60%. Se la parete da rilevare è lunga, si faranno altre stazioni con le camere, collocandole a distanze regolari lungo un asse parallelo al muro, da cui saranno scattati altri fotogrammi che dovranno sovrapporsi tra loro, ma anche con quelli precedenti e seguenti. Il formato dell'immagine risulta di gran lunga inferiore ai fotogrammi aerei, come pure le focali che montano queste camere variano dai 6 mm ai 30 mm.

La campagna fotogrammetrica va eseguita in condizioni di luce ideali e viene seguita da una battuta di rilievo con la stazione totale finalizzata a determinare le coordinate spaziali sia dei punti di stazione delle fotocamere, che andranno opportunamente materializzati sul terreno, sia di una serie di punti di riferimento situati sull'oggetto ripreso comuni alle varie coppie di fotogrammi. Si richiedono almeno sei punti per ogni stereo-coppia, contrassegnati da marche metalliche bicolori in modo da risultare ben visibili.

Capitolo 3

Calibrazione delle ottiche utilizzate

3.1 L'apparato sperimentale

Presso il Laboratorio di Geologia Applicata del Dipartimento di Geoscienze dell'Università degli Studi di Padova è disponibile l'apparato sperimentale (Figura 3.1) che costituisce il supporto per lo studio fotogrammetrico del comportamento dinamico di un ammasso granulare. L'apparato sperimentale è costituito da due piani a pendenza variabile, da otto telecamere per la ripresa sincronizzata dell'ammasso granulare in movimento, da un sistema di acquisizione delle immagini provenienti dalle otto telecamere.

Le operazioni svolte in laboratorio ai fini della calibrazione delle ottiche montate sulle telecamere sono le seguenti:

- posizionamento dei piani di monte e di valle della canaletta secondo l'angolo stabilito;
- posizionamento di target retroflettenti al fondo;
- montaggio delle camere sulle impalcature soprastanti la canaletta;
- verifica della sincronizzazione nell'acquisizione delle immagini da parte delle camere;
- creazione di un sistema di riferimento rispetto al quale restituire il rilievo fotogrammetrico;
- rilascio del materiale granulare sulla canaletta e acquisizione delle immagini durante il movimento;
- elaborazione fotogrammetrica attraverso il restitutore digitale.

Verranno prima eseguite delle analisi statiche del deposito per validare al meglio il metodo; in seguito si affronterà la ricostruzione fotogrammetrica dinamica.

3.1.1 L'apparato sperimentale

Per le applicazioni sperimentali è stata utilizzata una canaletta costituita da 2 piani inclinati in forex liscio, di dimensioni 150 cm \times 150 cm. Il piano di valle è stato posizionato ad una inclinazione di 6° sull'orizzontale, mentre il piano di monte è stato inclinato di 30°. Nella canaletta è possibile eseguire prove simulando situazioni reali di pendio aperto, rilasciando il materiale direttamente sul piano di monte, e di movimento incanalato, collocando sul piano di monte una canaletta in plexiglass trasparente mostrata in Figura 3.2. La canaletta ha le pareti di 1 cm di spessore e sezione trasversale rettangolare, con base di 20 cm e altezza di 15 cm. Nel caso di moto incanalato il serbatoio di alimentazione è stato ottenuto separando una parte a monte della canaletta con un setto rimovibile in plexiglass. Il setto viene inserito in 2 gargami ricavate sulle 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 dm³.

3.1.2 L'ammasso granulare

Il materiale utilizzato è costituito da ghiaie subangolari del diametro medio di 0.7 mm. Al fine di caratterizzare il materiale, ai fini di successive applicazioni matematico-numeriche, in laboratorio sono stati condotti dei test determinare:

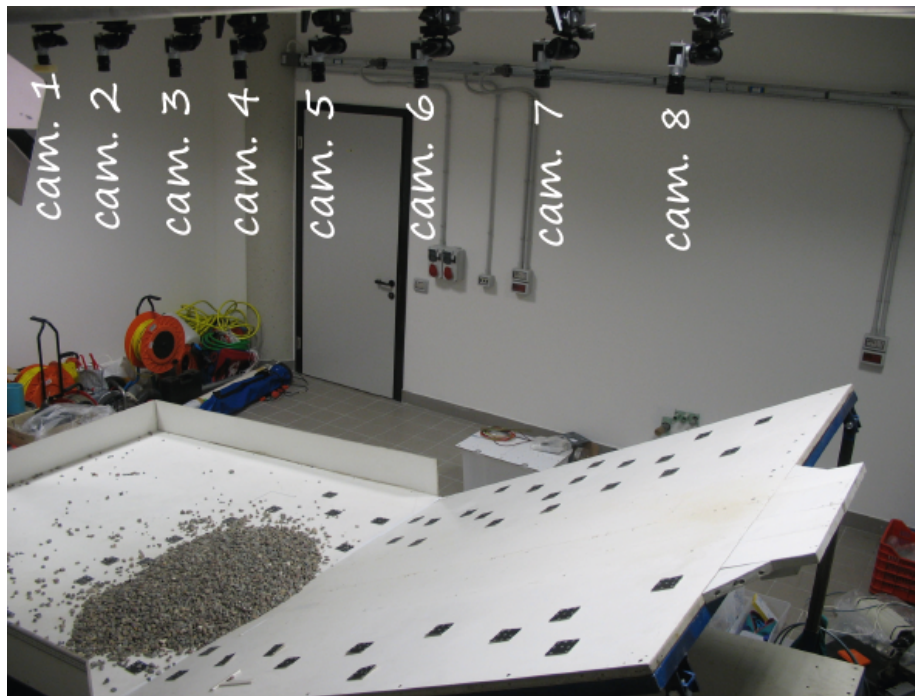


Figura 3.1: La canaletta sperimentale presso il Laboratorio di Geologia Applicata del Dipartimento di Geoscienze dell'Università di Padova, costituita da due piani a pendenza variabile, e le telecamere usate per le applicazioni fotogrammetriche.



Figura 3.2: Apparato sperimentale per le prove di moto incanalato.

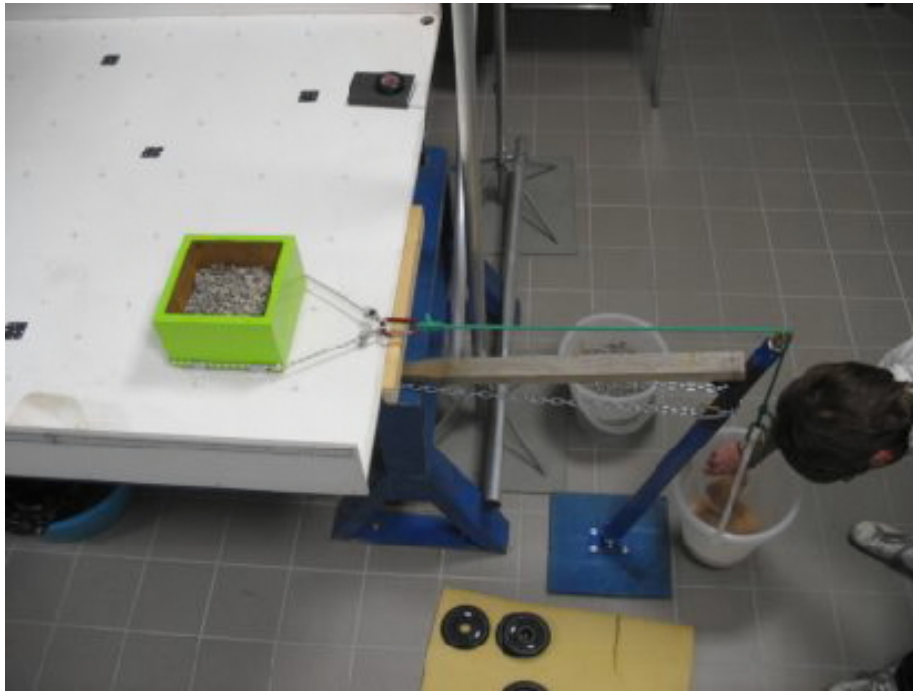


Figura 3.3: Apparato sperimentale per la determinazione dell'angolo d'attrito tra il materiale e la canaletta.

- l'angolo d'attrito tra il materiale granulare e la superficie della canaletta;
- l'angolo di natural declivio;
- l'angolo d'attrito dinamico del materiale.

L'angolo d'attrito materiale-canaletta

Per determinare l'angolo di attrito tra il materiale e la canaletta si è fatto uso di una scatola di taglio di dimensioni 19.2 cm \times 19.2 cm \times 15 cm. La scatola non ha fondo proprio. Il materiale viene inserito al suo interno e messo a contatto con il piano 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 granulare ed incrementando, così, lo sforzo tangenziale 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 3.3.

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).

In Tabella 3.1 sono riportati i valori di carico ottenuti nelle varie prove.

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

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

dove:

- φ : angolo d'attrito tra il materiale ed il fondo della canaletta;

$P^*(\text{kg})$				
$P_{\text{mat}}(\text{kg})$	Prova1	Prova2	Prova3	Prova4
2	1.18	1.23	1.19	1.21
4	2.25	2.23	2.30	2.32
6	3.41	3.40	3.42	3.48
8	4.57	4.61	4.69	4.74

Tabella 3.1: Risultato delle prove per i 4 step di carico..

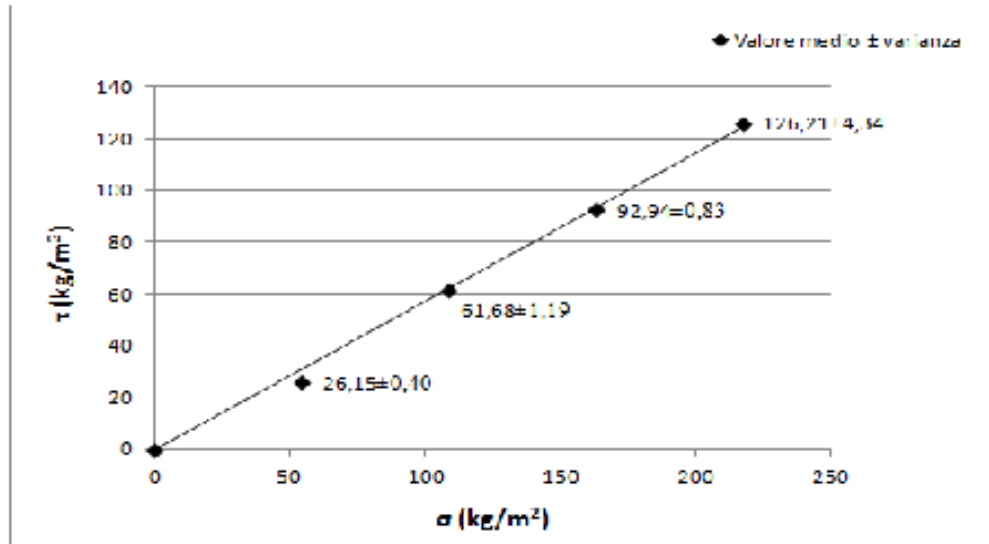


Figura 3.4: Curva caratterizzante il materiale granulare.

- 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).

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

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

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

è stato possibile determinare i valori di τ e σ delle prove per ogni valore del carico, calcolandone valore medio e varianza. In Figura 3.4 sono riportati i risultati delle elaborazioni.

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

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

che risulta:

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

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

$$\varphi = 29,7^\circ \quad (3.6)$$

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

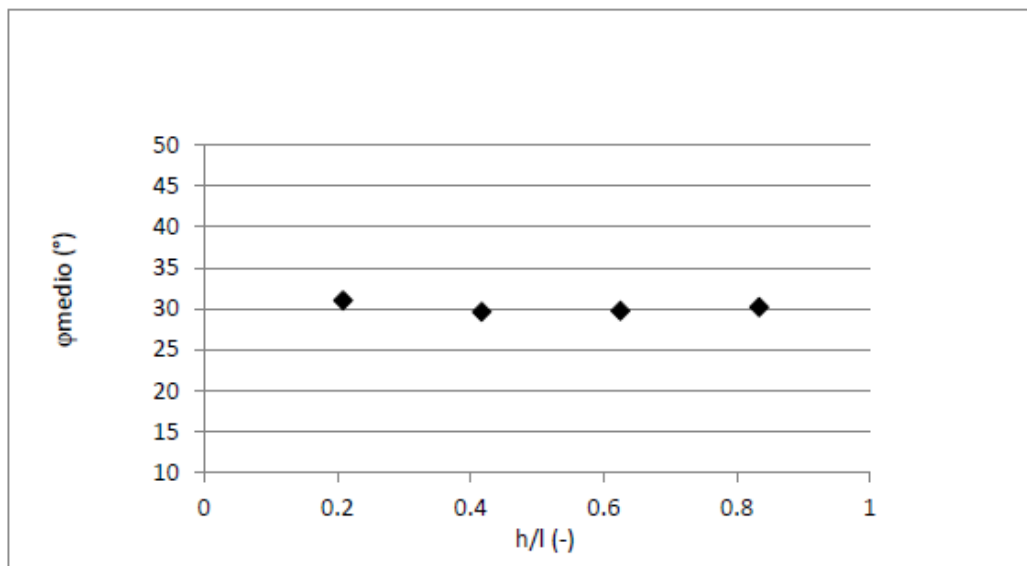


Figura 3.5: Andamento dell'angolo d'attrito medio calcolato per step di carico successivi.

maggiormente a questo fenomeno quando aumenta l'altezza di materiale nella scatola stessa. I risultati ottenuti in laboratorio dell'angolo d'attrito φ rispetto all'altezza del materiale, normalizzato al lato della scatola stessa (h/l), hanno mostrato come questo effetto possa ritenersi trascurabile (Figura 3.5).

L'angolo di natural declivio e dinamico del materiale

Con questa prova si vuole determinare, attraverso la variazione di pendenza del piano di valle (α) della canaletta, l'angolo di riposo (φ) che il materiale assume e successivamente l'angolo necessario per riattivarne il movimento. Dopo aver posizionato il piano di valle orizzontalmente si è accumulato il materiale granulare al di sopra come mostrato in Figura 3.6. Successivamente si è messo in funzione il pistone, incrementando la pendenza del piano fino a che il materiale non ha iniziato a mettersi in movimento e a stabilizzarsi secondo il suo angolo di riposo (Prova 1). Una volta fermato il pistone è stato stimato, sul deposito stesso, l'angolo assunto dal materiale mediante l'utilizzo della bussola da geologo dotata di clinometro, come mostrato in Figura 3.7. Una volta effettuata questa misura si è rimesso in funzione il pistone fino al nuovo movimento del deposito. L'angolo sull'orizzontale in corrispondenza del quale il materiale viene rimesso in movimento viene definito angolo di attrito dinamico (ϕ) (Figura 3.8). Se successivamente si incrementa di nuovo la pendenza della canaletta il materiale si muoverà analogamente. I dati raccolti nelle varie prove incrementando l'angolo della canaletta sono mostrati in Tabella 3.2.

	α (°)	φ (°)	ϕ (°)
Prova 1	10.5	36.0	38.5
Prova 2	13.0	35.0	37.5
Prova 3	15.5	34.0	36.5

Tabella 3.2: 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. Questo ha permesso attraverso l'utilizzo del software AgiSoft PhotoScan, spiegato approfonditamente in seguito (§), di elaborare due modelli 3D, durante la Prova 3, uno dell'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



Figura 3.6: Accumulo del materiale sulla canaletta posta orizzontalmente.



Figura 3.7: Determinazione manuale dell'angolo di riposo del materiale.



Figura 3.8: Nuova configurazione del materiale dopo aver variato la pendenza della canaletta.

in Figura 3.9 dove vengono riportati i profili del deposito in questi due istanti. Su di essi sono stati calcolati i valori di pendenza della canaletta, dell'angolo di natural declivio e l'angolo di attrito dinamico riportati in Tabella 3.3.

	α (°)	φ (°)	ϕ (°)
Prova 3 Sperimentale	15.5	34.0	36.5
Prova 3 Fotogrammetria	14.5	33.0	35.5

Tabella 3.3: Confronto tra i valori sperimentali determinati sul deposito e i valori calcolati dal modello tridimensionale elaborato dal programma Agisoft Photoscan.

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 evidenziato differenze di misura sostanziali, ed anzi hanno così validato la precisione di AgiSoft Photoscan, il quale verrà per questi motivi utilizzato in seguito per l'elaborazione della prova statica e delle prove dinamiche.

Altre proprietà del deposito (altezza massima, lunghezza massima e larghezza massima) sono state misurate direttamente in laboratorio ed il loro valore confrontato con i valori ottenuti con il rilievo fotogrammetrico. In Tabella 3.4 sono riportati i valori delle misurazioni dove:

- d (m) è la lunghezza del deposito;
- l (m) è la larghezza del deposito;
- h (m) è l'altezza del deposito.

	d (m)	l (m)	h (m)
Valori Sperimentali	0.51 ± 0.01	0.48 ± 0.005	0.11 ± 0.005
Valori Fotogrammetria	0.5 ± 0.01	0.48 ± 0.01	0.12 ± 0.01

Tabella 3.4: Confronto tra i valori sperimentali determinati sul deposito e i valori calcolati dal modello tridimensionale elaborato dal programma Agisoft Photoscan.

Il confronto tra i dati mostra come l'elaborazione fotogrammetrica con AgiSoft PhotoScan risulti affidabile e si adatta bene alla nostra configurazione di acquisizione.

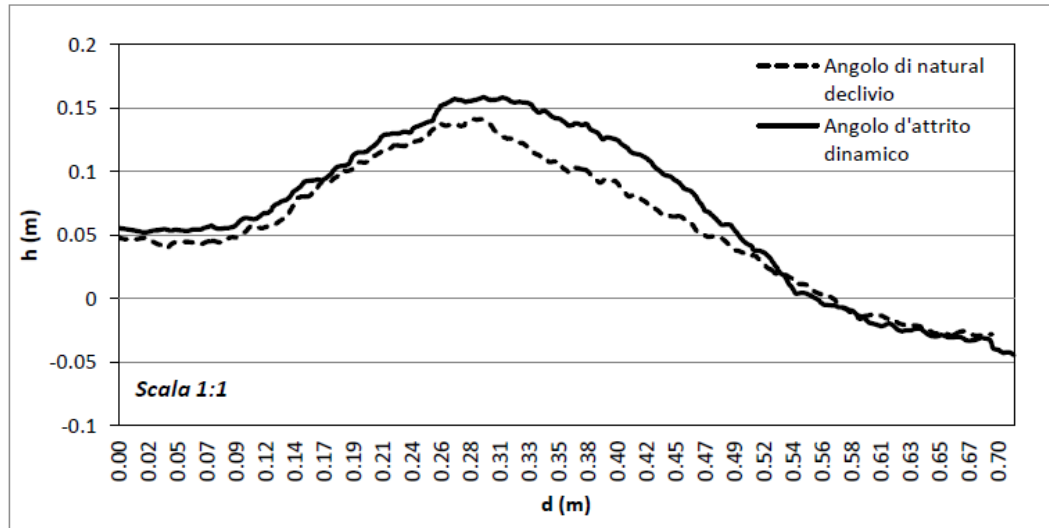


Figura 3.9: Profilo longitudinale dell'ammasso granulare durante le prove per determinare l'angolo di natural declivio e l'angolo d'attrito dinamico.

3.1.3 Il computer

Il PC utilizzato durante la sperimentazione ha un sistema di acquisizione e archiviazione dei dati basato su otto dischi RAID ad alta velocità (circa 2,6 Gb/s).

L'intero processo di acquisizione è gestito da un programma "MainTaskSync.vi" utilizzato per acquisire ed archiviare le immagini da 8 telecamere collegate con protocollo GigE a 2 schede NI PCIE-8235, Quad GigE. Sul PC è anche installata una scheda NI PCI-6602, 32-bit counter/timers, Up to 32 digital I/O lines (5 V/TTL) che viene utilizzata per generare il segnale di trigger per l'acquisizione dei frame sincrona da parte delle telecamere.

Il programma di acquisizione

Il programma utilizzato, scritto in ambiente Labview, 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);
- otto moduli di archiviazione immagini. Per l'archiviazione delle immagini utilizza una tecnica "stream to disk" velocizzando l'archiviazione delle immagini;
- un programma per la lettura degli archivi binari e l'archiviazione delle singole immagini in formato JPG, BMP oppure TIFF.

L'interfaccia del software di acquisizione è mostrata in Figura 3.10. 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;

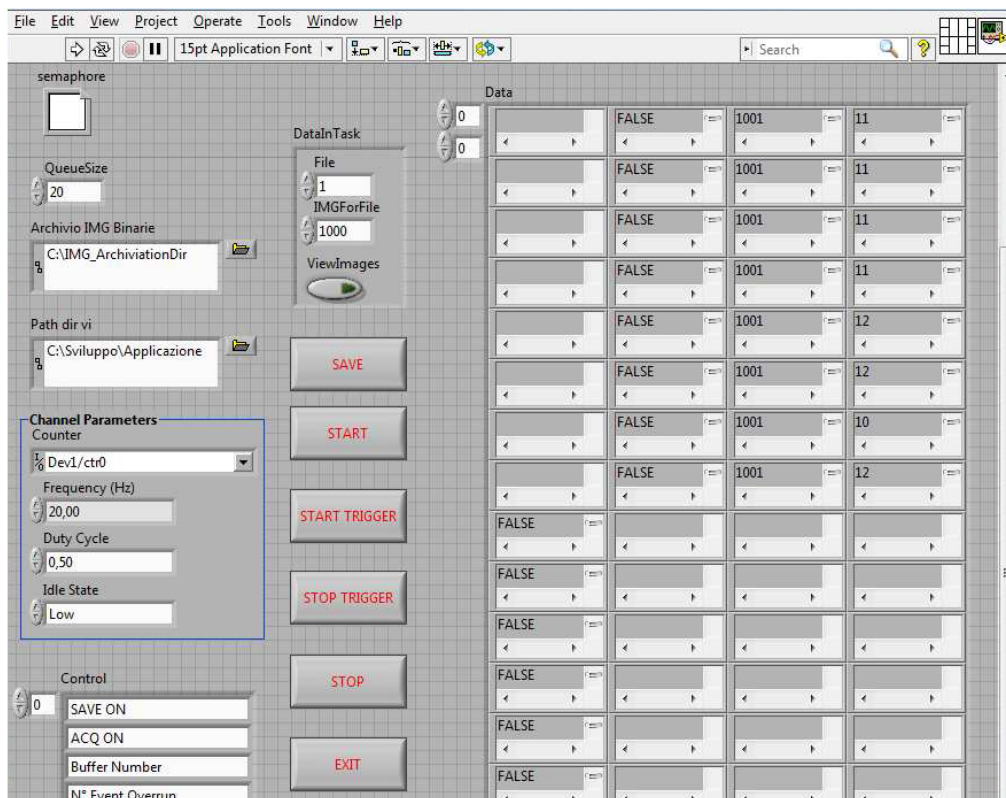


Figura 3.10: Interfaccia del software di acquisizione scritto in Labview.

- *Channel Parameters*: parametri per il funzionamento del segnale di trigger. Si utilizza il counter ctr0 della scheda NI PCI-6602. Per default la frequenza del segnale di trigger è pari a 20 Hz. Il segnale di trigger viene “smistato” all’opportuno ingresso delle telecamere (Ingresso di Trigger). Il frame rate è pari alla frequenza del segnale generato dal counter;
- *DataInTask*: parametri di controllo del funzionamento dei Task di Archiviazione. *File* definisce il numero di file che saranno archiviati da ciascun Task. *ImgForFile* definisce il numero di immagini che saranno archiviate su ciascun file.
- *Data*: informazioni sul funzionamento dei Task.

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

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 inizieranno 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.

Durante le fasi di test del programma si è verificata la perdita di alcuni frame in modo totalmente casuale. L’origine del problema può essere sia software che hardware e non è stata ancora identificata. I frame persi sono comunque rilevati attraverso le indicazioni disponibili alla quarta colonna della matrice *Data* e, successivamente, identificabili con la esportazione dei file binari in immagini.

3.2 Le videocamere

3.2.1 Le videocamere digitali

Nella *camera fotografica tradizionale* l’immagine della realtà viene proiettata sul piano focale dove è situata la *pellicola*. La luce (i fotoni) riflessa dalla scena ripresa colpiscono i granuli di alogenuro d’argento dell’emulsione fotografica e li modificano in modo tale che quando la pellicola subisce il procedimento chimico di sviluppo essi si anneriscono tanto più quanto maggiore è il numero di fotoni che li ha colpiti. Nel momento della presa si forma un’immagine latente, non altro che la discretizzazione dell’immagine della

realtà secondo il tessuto irregolare dei granuli di alogenuro d'argento. L'immagine latente viene ridotta in un rapporto di scala rispetto alla realtà che dipende dalla focale dell'obiettivo e dalla distanza della scena dall'obiettivo stesso. L'immagine successivamente viene deformata rispetto a quella che sarebbe una rigorosa prospettiva centrale dall'effetto della distorsione prodotta dall'obiettivo. Vi è quindi la possibilità che la geometria dell'immagine latente venga alterata a causa della natura del supporto su cui viene registrata e a causa dei trattamenti di sviluppo. Questo va a modificare la corrispondenza tra l'immagine proiettata sul piano focale al momento della presa e l'immagine sviluppata.

La *camera fotografica digitale* cattura l'immagine latente in formato numerico e la trasmette e conserva nel tempo senza alterazioni. Al momento della presa si determina il rapporto tra la posizione del punto nello spazio e la sua immagine, rapporto che rimane costante nel tempo. La camera digitale riprende la scena attraverso un obiettivo e l'immagine viene raccolta sul piano focale da un sensore elettronico, che cattura e memorizza l'immagine, chiamato **CCD** (Charged-Coupled Device) mostrato in Figura 3.11.

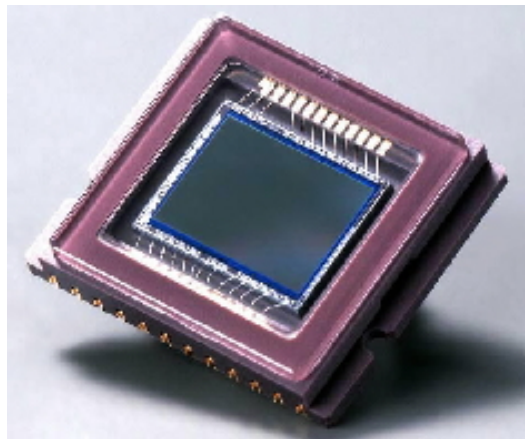


Figura 3.11: Sensore elettronico per la cattura e la memorizzazione dell'immagine mediante una camera fotografica digitale (Charged-Coupled Device).

Esistono tre categorie di camere:

- *Camere metriche*: dotate di obiettivo con aberrazioni trascurabili, appositamente costruite per scopi fotogrammetrici;
- *Camere semimetriche*: costruite in origine per scopi non fotogrammetrici. Non tutti i parametri di orientamento interno risultano stabili, l'obiettivo ha distorsione non trascurabile ma della quale si conosce la relativa curva di distorsione;
- *Camere non metriche*: utilizzate solo per applicazioni fotogrammetriche di scarsa precisione; la curva di distorsione, assieme ad altri parametri, risulta incognita.

Il CCD

Il CCD (Figura 3.11) è costituito da una piastrina di silicio, quadrata o rettangolare, suddivisa in una fitta griglia di pixel (di *tipo a matrice* o di tipo area array). È un circuito integrato di elementi semiconduttori in grado di accumulare una carica elettrica proporzionale all'intensità della radiazione elettromagnetica che li colpisce. La funzione del CCD è poi quella di trasformare questa energia in una matrice di valori numerici. I vari pixel reagiscono alla luce e immagazzinano carica elettrica la quale viene letta in continuazione con una frequenza regolata dall'otturatore elettronico. L'otturatore elettronico o shutter accelera la frequenza di lettura all'aumento della luminosità in modo da evitare che i pixel restino sovraesposti alla luce e la telecamera dia un'immagine sfocata. Il sensore è posto in corrispondenza del punto focale (Figura 3.12).

Le immagini digitali

La parola *immagine digitale* può far pensare che l'immagine digitale sia un'immagine analoga a quella di tipo fotografico, con l'unica variante di essere presentata alla nostra vista sul video di un computer o mediante qualche altro dispositivo elettronico. La vera differenza consiste nel fatto che l'immagine

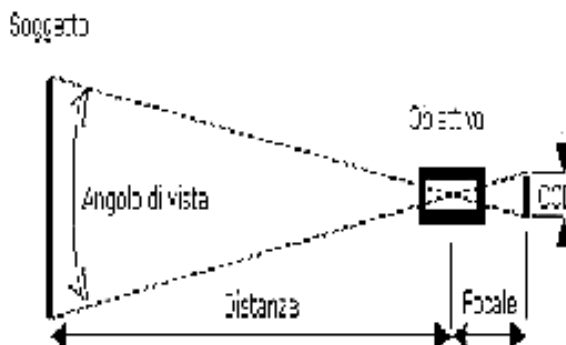


Figura 3.12: La posizione del CCD.

osservata a video è materializzata dalla diversa illuminazione dei pixel del video, e quindi l'immagine che si crea sulla nostra retina è il risultato di una luce emessa, mentre quando osserviamo una fotografia l'immagine che si forma sulla nostra retina è generata dalla luce riflessa dalla fotografia stessa.

Un'immagine digitale è una matrice bidimensionale M i cui elementi sono m_{ij} valori numerici rappresentativi della quantità di energia emessa o riflessa da un oggetto. Ciascuno di questi elementi è un pixel (*picture element*). Nella matrice l'indice di riga varia da 1 a i con passo unitario e così pure per l'indice di colonna da 1 a j . Il pixel rappresenta un elemento di immagine e le sue dimensioni sono Δ_ε e Δ_η . I pixel sono l'informazione e il valore numerico di ciascun pixel dipende dal sensore e dal calcolatore che viene utilizzato. L'intervallo di valori m_{ij} più usato è quello che va da 0 a 255, intervallo che supera di molto le possibilità di selezione della vista umana. L'informazione contenuta nei 256 valori può essere memorizzata in otto bit ($256 = 2^8$ combinazioni di bit) e, nella maggior parte dei calcolatori ciascun gruppo di 8 cifre costituisce una entità, detta byte. Nelle immagini in bianco e nero i valori dei pixel rappresentano i livelli di grigio, dove, lo 0 indica il nero e il 255 il bianco. L'occupazione di memoria di una immagine digitale è variabile in funzione della dimensione del pixel e a seconda che l'immagine sia in bianco e nero o a colori. Il numero di pixel contenuto in una unità prefissata di lunghezza esprime la risoluzione geometrica dell'immagine e può essere misurata indicando il numero di pixel contenuti in un pollice (dpi, dots per inch). Se si vuole utilizzare un'immagine digitale per scopi fotogrammetrici, è necessario stabilire una relazione tra la posizione del pixel e il sistema di coordinate immagine ε ed η . (§ ...)

Una precisione adeguata della indagine fotogrammetrica dipende dalla dimensione dei pixel.

3.2.2 Le videocamere Ace GigE Basler

Sono state utilizzate otto camere Basler Ace GigE (Figura 3.13), 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. Le motivazioni per aver scelto obiettivi a focale fissa, piuttosto che zoom, sono molteplici:

- la focale fissa è meno soggetta ad aberrazioni poichè 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".

3.2.3 Specifiche generali

Le specifiche delle telecamere vengono riportate nel manuale d'uso e sono elencate in Figura 3.5. I parametri da conoscere approfonditamente per i nostri scopi sono:

- Sensor Size: è la grandezza espressa in pixel del CCD. Dà una misura della risoluzione dell'immagine;



Figura 3.13: Una immagine delle camere Ace GigE Basler utilizzate nelle sperimentazioni.

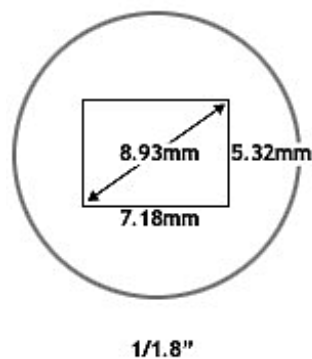


Figura 3.14: Il metodo per esprimere la grandezza del CCD: Optical Size.

- Sensor Type: il nostro CCD è di 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;
- Optical Size: è un metodo per esprimere la grandezza del CCD. Si esprime come $1/1.8''$ e non rappresenta la diagonale della CCD ma il diametro esterno di un tubo di vetro circolare come mostrato in Figura 3.14 (metodo di misura utilizzato una volta e rimasto in uso). Il diametro di questo piano immaginario è approssimabile ai $3/2$ della diagonale del CCD. Da questo parametro si possono ricavare parametri come l'*aspect ratio* pari a $4 : 3$, *diametro* 14.11 mm del tubo e le dimensioni del CCD quali: diagonale 8.93 mm , larghezza 7.18 mm e altezza 5.32 mm ;
- Pixel Size: misura in μm dei lati del pixel. I pixel nel nostro caso sono quadrati;
- Max Frame Rate: esprime il numero massimo di scatti che la camera esegue, in un secondo, alla massima risoluzione;
- Mono/Color: le nostre camere acquisiscono immagini in scala di grigi; questo aumenta la risoluzione dell'immagine.

Nello specifico le nostre otto telecamere sono montate sulle impalcature al di sopra della canaletta attraverso l'utilizzo di appositi supporti che sfruttano i fori già predisposti sulla parte inferiore delle camere. Questi supporti premettono alle telecamere la rotazione intorno ai tre assi principali.

La *risposta spettrale* non dipende dalle caratteristiche della lente che montano le camere né dalla fonte di luce che impressiona la CCD, ma dipende dalla sola camera. Quello che si nota dalla Figura 3.15 è che si ha massima risposta spettrale per lunghezze d'onda attorno ai 500 nm , valore dovuto alla risposta alla frequenza della luce visibile attorno ai 600 THz .

Specification	acA 1600-20 gm/gc
Sensor Size (Ho. Vert. Pixels)	gm: 1628 x 1236 gc: 1624 x 1234
Sensor Type	Sony ILX174 AL/AL Progressive scan CCD Global shutter
Optical Size	1/1.8"
Pixel Size	4.4 μm x 4.4 μm
Max. Frame Rate (at Full resolution)	20 fps
Mono/Color	Mono
Host Input Type	1 x RJ-45 (10/100/1000 Mbps) 1 x RS-485 (1000 Mbps)
Synchronization	Via external trigger signal, via the Ethernet connection, or free run
Exposure Control	Via external trigger signal or programmable via the camera API
Camera Power Requirements	1 x RJ-45 (Power over Ethernet IEEE 802.3at compliant) or +12 VDC ($\pm 10\%$), < 1.5 A ripple, supplied via the camera's 6 pin Hirose connection
Size (L x W x H)	47.0 mm x 71.0 mm x 31.0 mm (without lens adapter or connectors) 60.0 mm x 90 mm x 30 mm (with lens adapter and connectors)
Weight	< 50 g
Camera Driver	Basler's Gig_Vision compliant pylon SDK including filter and performance drivers.

Tabella 3.5: Specifiche delle camere Basler acA 1600-20 gm/gc..

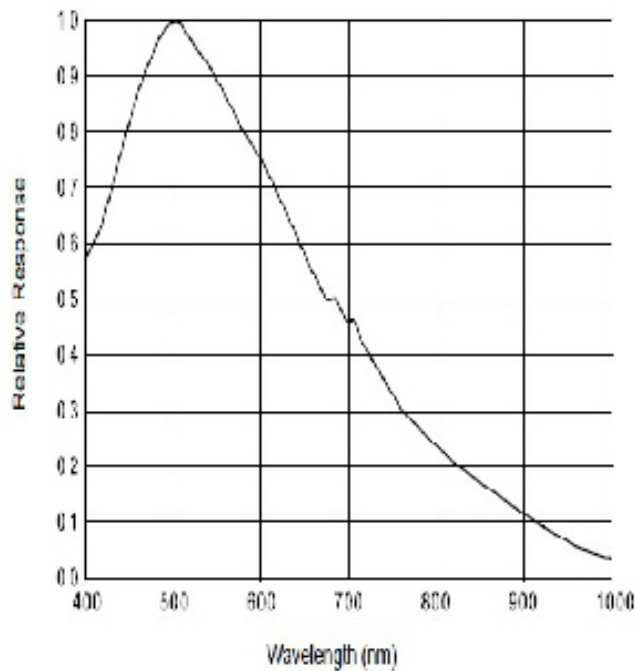


Figura 3.15: Risposta spettrale delle camere utilizzate.

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° circa. 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 [13].

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 [0 – 5 V] , 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 cables 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.

3.2.4 Sincronizzazione delle camere

La verifica della sincronia delle immagini, che corrisponde alla verifica hardware e software dell'intero sistema di acquisizione, trasmissione e archiviazione delle immagini, è stata realizzata mediante l'uso di un cronografo ripreso simultaneamente dalle otto telecamere.

L'acquisizione a 20 Hz è stata fatta per un periodo di 6 s. In Figura 3.16 sono mostrati gli scatti al $t = 1$ s, mentre in Figura 3.17 sono mostrati gli scatti per $t = 4$ s. Nelle immagini si può notare come la lancetta del cronografo, ripreso dalle otto telecamere, sia nella medesima posizione in entrambi i casi. Questo assicura circa la sincronizzazione dei frame.

3.2.5 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'obbiettivo (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.

Per il nostro studio fotogrammetrico si sono 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 presenta due inclinazioni differenti dei suoi piani, la distanza tra questa e le telecamere risulta variabile. Da qui deriva la necessità di avere focali differenti come mostrano i progetti in Figura 3.18, Figura 3.19 e in Figura 3.20. Nei progetti una volta messa in scala canaletta, cavalletto d'appoggio e pistone idraulico si sono ipotizzati tre scenari diversi con l'uso di 8 telecamere con la stessa focale. Per le tre focali del progetto si sono calcolati gli angoli di campo (α) secondo la formula:

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

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 avere una buona esposizione dell'immagine è necessario valutare 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 col 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. In ogni caso, la quantità di luce che andrà ad impressionare la pellicola sarà sempre la stessa e la scelta della coppia di valori tempo di esposizione- diaframma dipenderà esclusivamente dal tipo di fotografia. Il tempo di esposizione si misura in secondi. 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'obiettivo, che ha il compito di controllare la quantità di luce che raggiunge la pellicola (in una fotocamera convenzionale) o i sensori (in una fotocamera digitale) nel tempo in cui l'otturatore resta aperto (tempo di esposizione). Il centro del diaframma coincide con l'asse ottico della lente. 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 $f(f/\text{numero})$ 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 del deposito 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 proprio a 20 Hz, si potrà 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. Per la scelta degli illuminatori si sono adottati 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 nostro caso pratico la necessità è quella di avere tempi di esposizione brevi, di modo da poter caratterizzare, il più accuratamente possibile, l'ammasso in movimento.

Si sono fatte dapprima prove con il contasecondi analogico e le camere cam0 e cam7 e si sono 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 3.21. 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.

Successivamente sono state eseguite prove analoghe con l'ammasso granulare in movimento a velocità superiori rispetto a quelle analizzate in precedenza. Si è proceduto alla stessa maniera indicata in precedenza.

La sequenza di acquisizione è mostrata in Figura 3.22. Si nota che, come nelle prove con il contasecondi, diminuendo progressivamente il tempo di esposizione, e variando conseguentemente gli altri parametri, l'immagine dell'ammasso granulare in movimento risulta sempre più nitida fino a divenire utilizzabile ai fini fotogrammetrici.

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.

3.2.6 Calibrazione

Il processo di calibrazione è necessario in fotogrammetria quando le camere a disposizioni sono camere digitali non metriche.

La calibrazione consiste nel conoscere l'orientamento Interno della telecamera, cioè stimare i parametri di distanza principale c , le coordinate immagine del punto x_0 e y_0 , i coefficienti di distorsione radiale (k_0, k_1, k_2) e i coefficienti di *decentering distortion* (p_1, p_2) che, insieme, vengono chiamati *Additional Parameters (APs)*.

Ci si è avvalsi dell'utilizzato del software commerciale Australis (*Software for Close-Range Digital Photogrammetry, 2012* ©) che permette di eseguire il calcolo dei parametri della telecamera producendone un report stampabile.

La calibrazione avviene utilizzando sul fondo della canaletta dei target retroriflettenti forniti dallo stesso provider del software Australis. Ogni target è composto da otto elementi retroriflettenti circolari del diametro di 6 mm che il programma riconosce automaticamente durante la calibrazione. Questi target fungono da riferimento per determinare i GCP nelle operazioni successive.

Durante le operazioni di calibrazione le telecamere sono state montate, mediante appositi supporti, sulla struttura reticolare sovrastante la canaletta. Le riprese sono state effettuate da quattro stazioni di presa, indicativamente collocate ai vertici del piano di valle a due quote distanti circa 2 m e 1.15 m sopra lo stesso. Da ogni stazione sono stati catturati due scatti ruotando la camera di 90° attorno all'asse di ripresa (angolo di roll), mantenendo fissa però la messa a fuoco e l'apertura del diaframma, regolate a inizio riprese.

Il software Australis

Per elaborare le immagini mediante il software Australis va dapprima settato il progetto su tipo e scala di target utilizzato [*Edit/Project Setting*], poi si può procedere con la creazione di un nuovo progetto [*File /New*] nel quale si scelgono le foto da caricare nello stesso. Durante questa operazione va specificata il tipo di telecamera usata per le prese attribuendole un nome, la focale (in mm) e i pixel size del CCD. Una volta impostati questi parametri fondamentali il programma è pronto e una delle funzioni con la quale si può procedere è proprio la calibrazione [*Photogrammetry/AutoCal*]. Dopo aver dato il *Begin* il software riconosce automaticamente i target nelle varie prese e conclude il processo mandando a schermo gli *Additional Parameters* determinati. Si può scegliere se accettare o meno la calibrazione in base all'indice di qualità che viene assegnato all'iterazione (good, average, bad) e all'accuratezza interna stimata. In caso di rifiuto del risultato o fallimento del processo si può procedere eliminando le prese nelle quali sono stati riconosciuti pochi o nessun target, facendo dei tentativi di iterazione fino a giungere al risultato voluto. I risultati ottenuti possono essere esportati in un report (*file .pdf*).

I risultati della calibrazione

I risultati del processo di calibrazione vengono valutati confrontando per ogni telecamere tutti gli APs e soprattutto le *Radial Distortion Curves* evidenziando differenze e similitudini tra le varie telecamere.

	c (mm)		Xp(mm)		Yp(mm)	
	2m	1.15m	2m	1.15m	2m	1.15m
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	-0,0900	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	0,0870
cam6	6,2098	6,1905	-0,1326	-0,1356	0,0796	0,0729

Tabella 3.6: I parametri di orientamento interno a seguito della calibrazione effettuata per altezze delle camere di 2 m e di 1.15 m.

Osservando la tabella dei risultati in Figura 3.6 si può osservare che:

- i valori di focale, calcolati con Australis per le due altezze diverse, variano dell'ordine di qualche micron o decimo di micron;
- le coordinate del centro della CCD variano di qualche micron.

Confrontando le curve di distorsione radiale osservabili in Figura 3.23 si può affermare che la distorsione radiale nelle camere con focale 6 mm è di due ordini di grandezza superiore a quelle con focale 8 mm e 12 mm avvicinandosi ai bordi della CCD..

Se si sovrappongono curve di camere differenti (Figura 3.24, Figura 3.25, Figura 3.26) aventi però la stessa focale si notano delle leggere variazioni dell'ordine di qualche μm soprattutto nella parte finale della curva in corrispondenza del bordo della CCD dove, come ci si deve aspettare, la distorsione radiale è massima. Inoltre si evidenzia un trend specifico per ogni focale. Per le 4 camere con focale 8 mm le differenze di trend sono maggiori che per le focali da 6 mm e 12 mm.

Per l'altezza di 2 m si sono fatte due serie di riprese con target diversi per poter confrontare le elaborazioni ottenute da *Australis* e da *iWitness* (altro software della stessa ditta fornitrice di Australis). Si è osservato che i valori degli APs calcolati con i due programmi presentano delle leggere differenze dell'ordine del μm visibili in Figura 3.7.

	c (mm)		xp(mm)		yp(mm)	
	iWitness	Australis 2m	iWitness	Australis 2m	iWitness	Australis 2m
cam0	12,7743	12,7727	-0,0191	-0,0138	0,1266	0,1185
cam5	12,7741	12,7705	-0,0191	0,0058	0,1272	0,1829
cam2	8,3200	8,3016	-0,0155	-0,0173	0,0481	0,0542
cam3	8,3015	8,3137	-0,1132	-0,0876	0,0199	0,0272
cam4	8,2871	8,2889	-0,0842	-0,0686	0,0698	0,012
cam7	8,3273	8,3171	0,0966	0,1025	-0,0546	-0,0643
cam1	6,1659	6,1824	-0,0171	-0,0266	0,0931	0,0932
cam6	6,1733	6,2098	-0,1324	-0,1326	0,0632	0,0796

Tabella 3.7: Risultati della calibrazione con i due programmi Australis e iWitness con le telecamere poste a 2m di altezza.

Si osserva inoltre che le differenze si presentano maggiori che nel caso precedente in cui si variava l'altezza di acquisizione e non il programma che svolgeva la calibrazione. Per le curve di distorsione radiale, messe a confronto in Figura 3.27, si notano leggere variazioni che non dipendono dalla diversa elaborazione con i due programmi ma dalla differenza strutturale tra le telecamere, i trend si mantengono distinti tra le focali anche in questo confronto, cosa che ci aspettavamo visto che i due software condividono le stesse basi teoriche.

Queste osservazioni ci portano a concludere che:

- è indifferente, per i nostri scopi, l'uso di Australis piuttosto che di iWitness;
- l'altezza dell'impalcatura non influisce sulla stima dei APs per cui l'impalcatura verrà posta ad un'altezza che permetterà di visualizzare al meglio il materiale granulare che verrà usato in seguito.

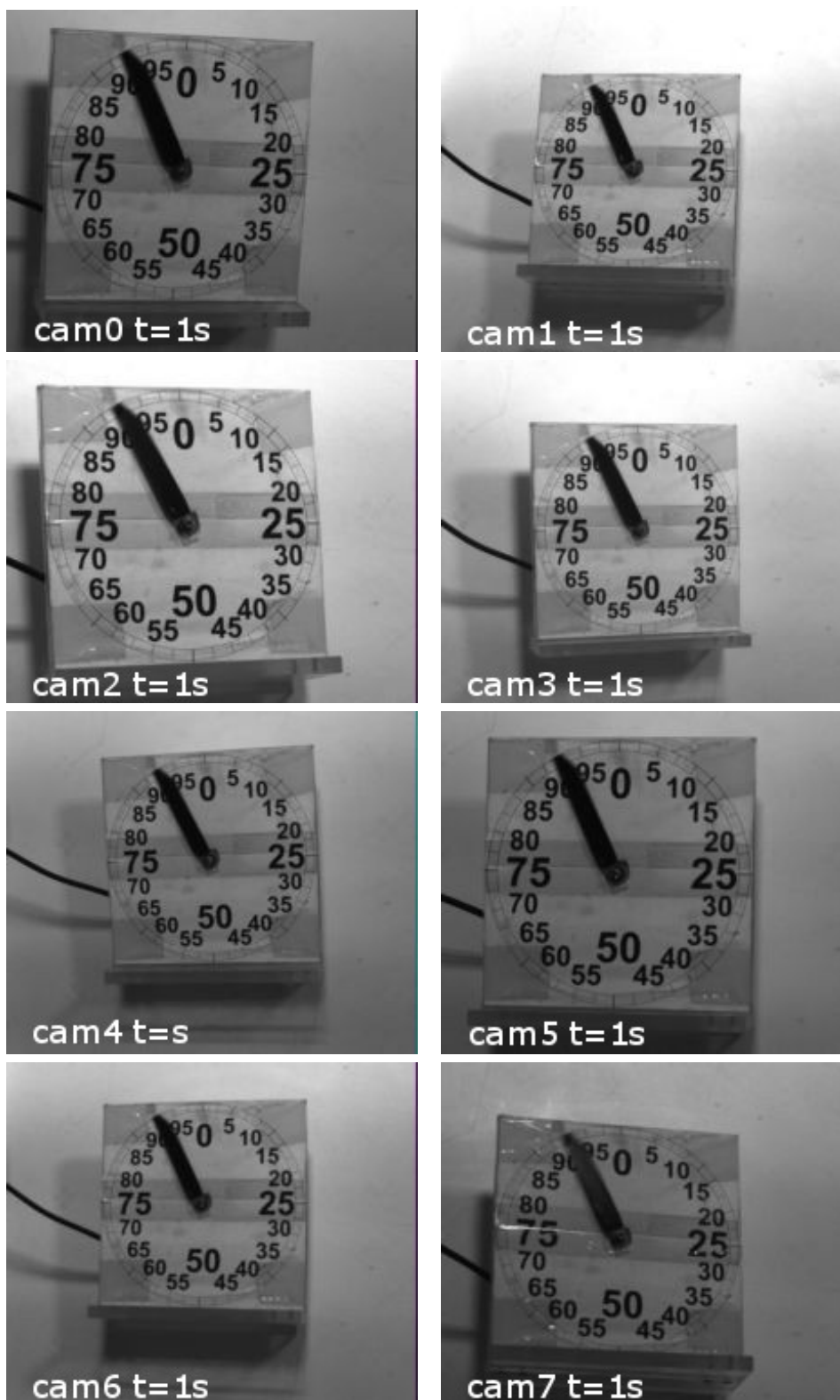


Figura 3.16: Sincronizzazione delle otto telecamere, al ventesimo frame di acquisizione, numerate partendo dall'alto a sinistra dalla cam0 alla cam7.

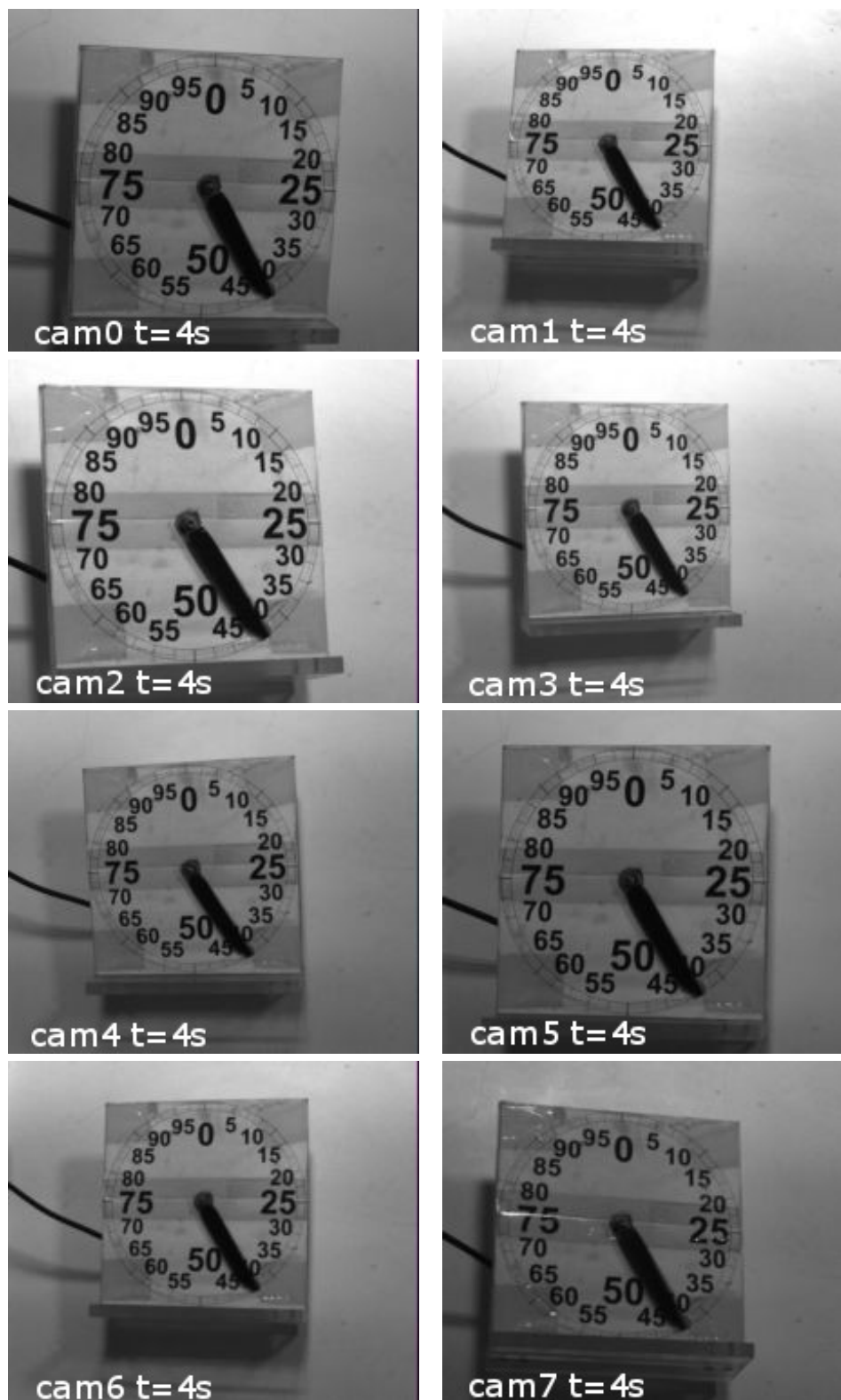


Figura 3.17: Sincronizzazione delle otto telecamere, all'ottantesimo frame di acquisizione, numerate partendo dall'alto a sinistra dalla cam0 alla cam7.

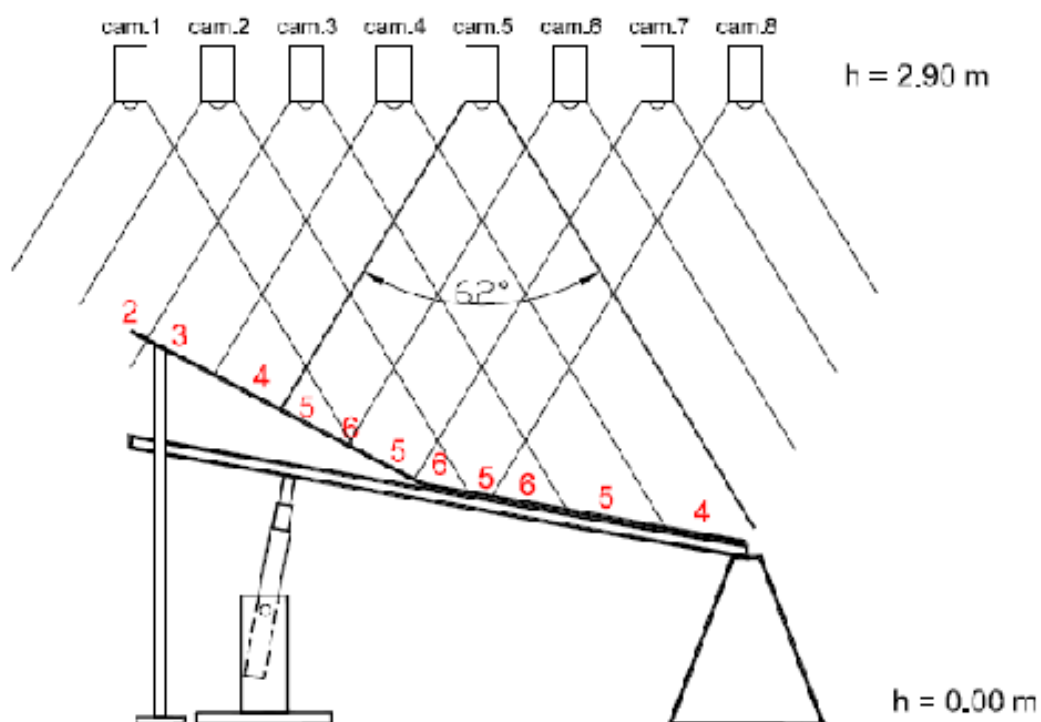


Figura 3.18: Progetto con telecamere a focale 6 mm e CCD da 1/1.8.

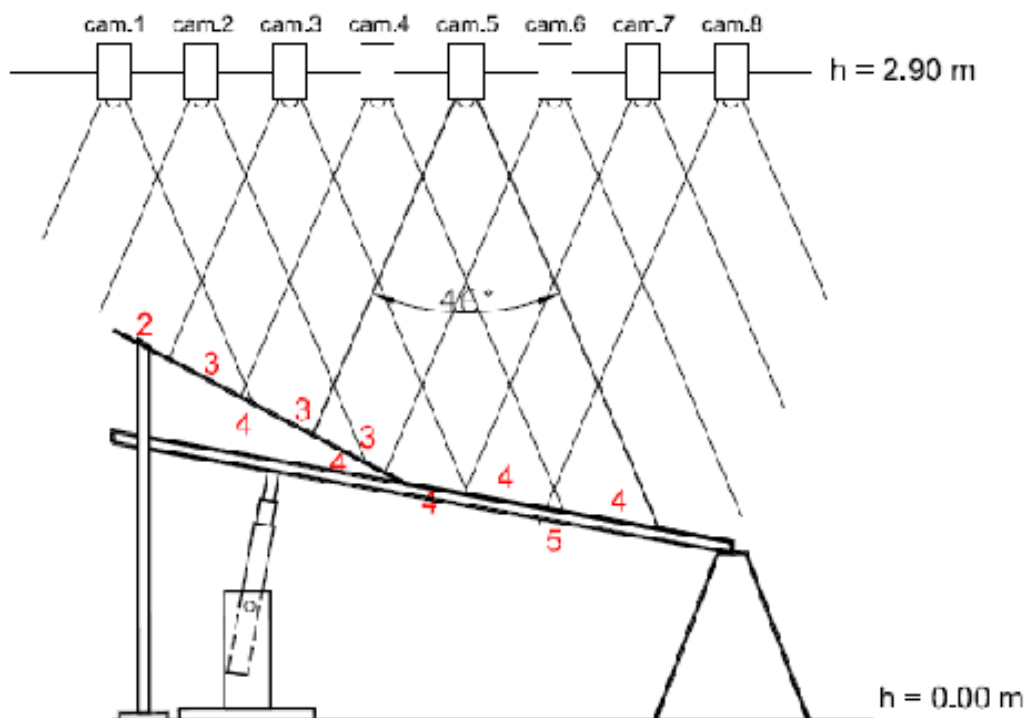


Figura 3.19: Progetto con telecamere a focale 8 mm e CCD da 1/1.8.

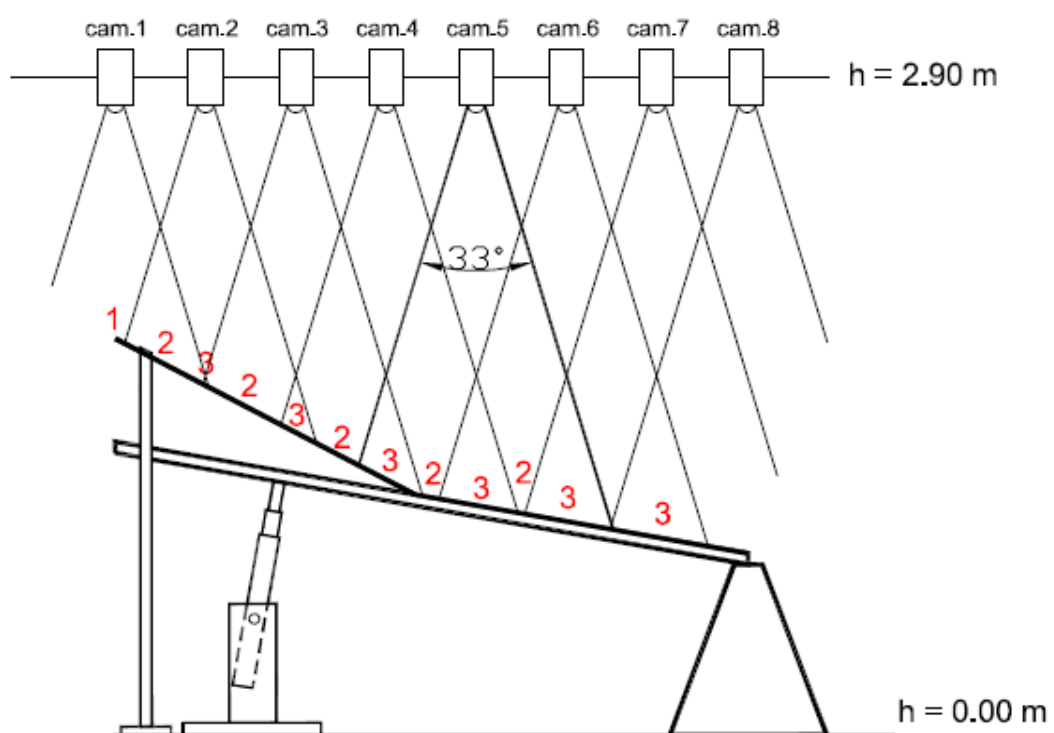


Figura 3.20: Progetto con telecamere a focale 12 mm e CCD da 1/1.8.

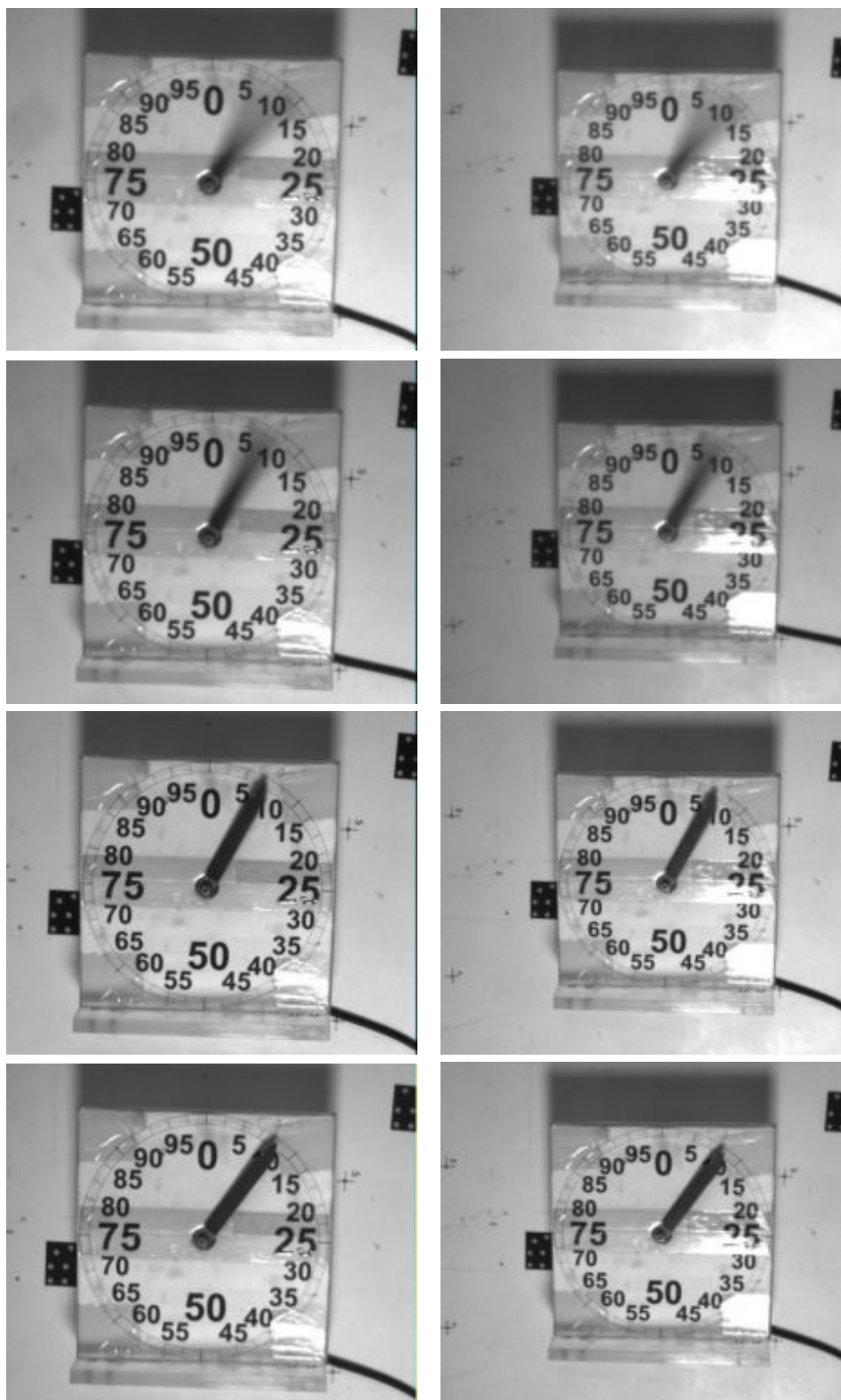


Figura 3.21: Fotogrammi presi dalla cam0 e cam7 durante le quattro acquisizioni. Partendo dall'alto dalla prima acquisizione alla quarta acquisizione.

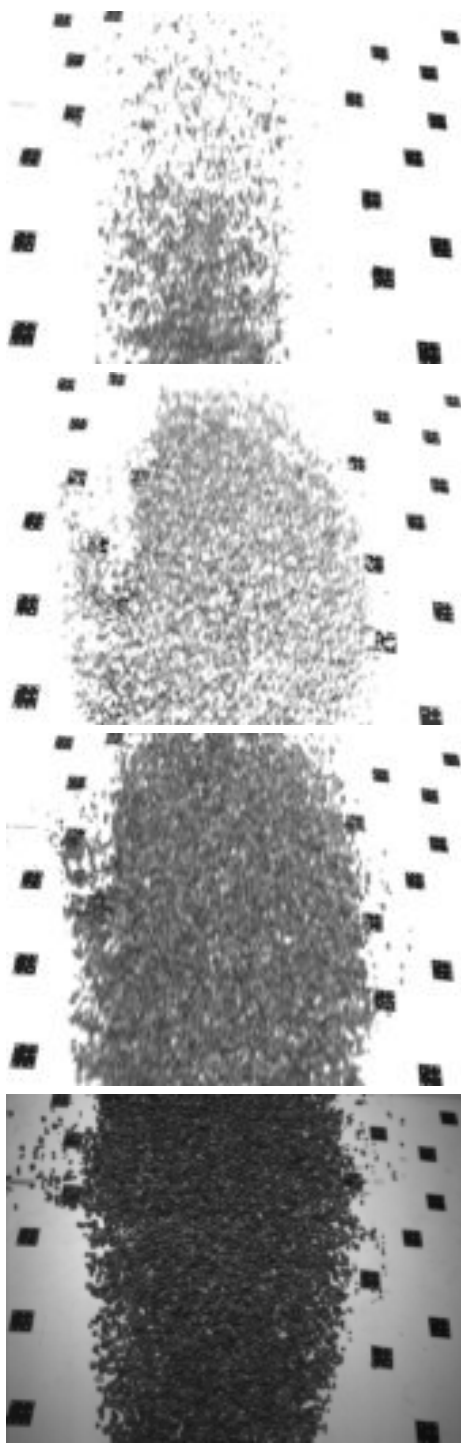


Figura 3.22: Fotogrammi presi dalla cam2 durante le quattro acquisizioni. Partendo dall'alto dalla prima acquisizione alla quarta acquisizione.

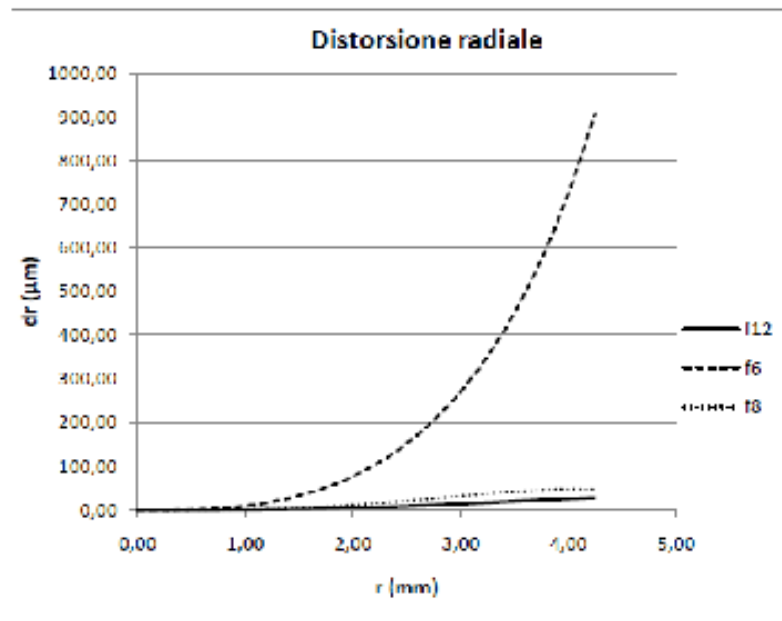


Figura 3.23: Curve di distorsione radiale calcolate con camere poste a 2m di altezza.

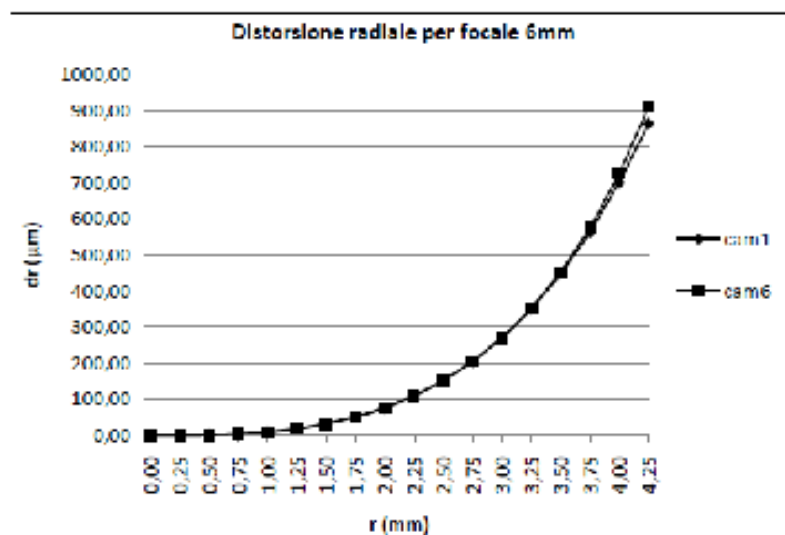


Figura 3.24: Distorsione radiale per camere con focale 6mm.

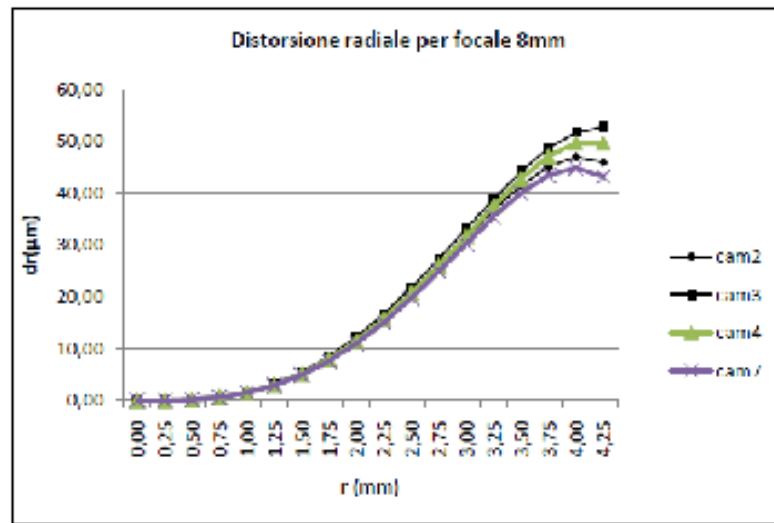


Figura 3.25: Distorsione radiale per camere con focale 8mm.

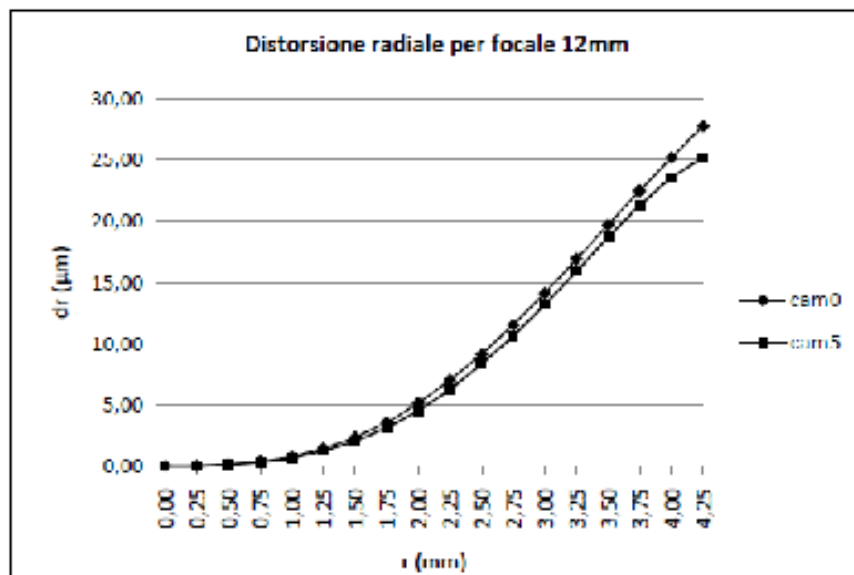


Figura 3.26: Distorsione radiale per camere con focale 12.

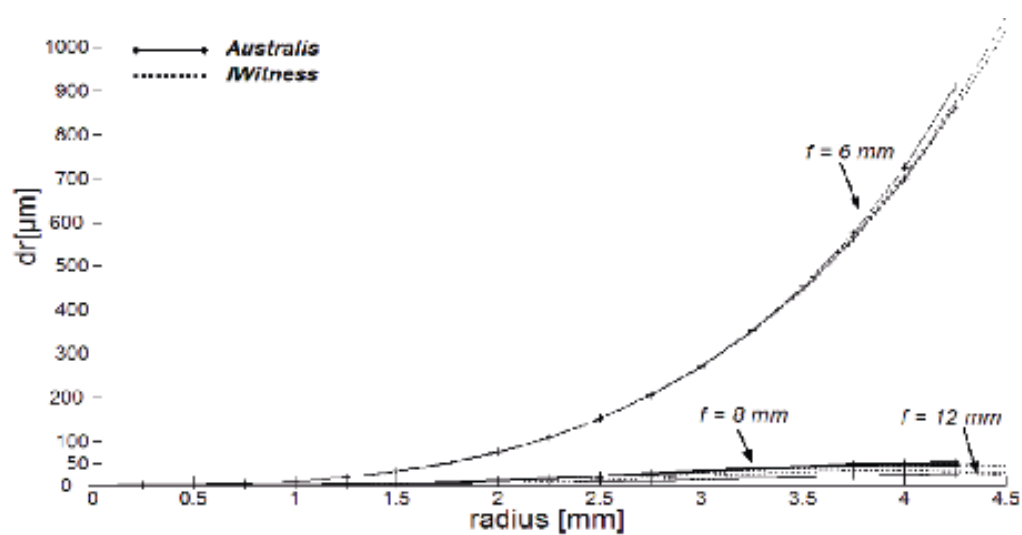


Figura 3.27: Curve di distorsione radiale calcolate con i programmi *Australis* e *IWitness* per tutte le focali utilizzate.

Capitolo 4

Applicazioni di laboratorio

I test di laboratorio sono finalizzati, in questa fase, a valutare le possibilità dei metodi costruiti nel riprodurre tridimensionalmente un ammasso granulare, sia in condizioni statiche che in condizioni dinamiche.

La configurazione assunta in laboratorio è quella già presentata nel capitolo precedente.

Sulla canaletta, a fondo rigido, vengono messi in movimento 7 kg di materiale granulare.

Durante la discesa del materiale il sistema sperimentale, composto dalle otto telecamere, acquisisce a 15 Hz .

Il test ha una durata di circa 6 s. Ogni telecamera acquisisce circa 100 immagini.

Ad ogni istante, utilizzando le otto immagini ottenute dalle otto video-camere, è possibile eseguire la elaborazione fotogrammetrica per ottenere il modello tridimensionale dell'ammasso granulare.

La necessità di eseguire le elaborazioni fotogrammetriche per un elevato numero di istanti ha indotto ad analizzare diversi software fotogrammetrici al fine di valutare le possibilità di automatizzazione delle procedure, mantenendo una adeguata precisione del rilievo. A questo scopo, sono state eseguite varie elaborazioni in configurazione statica (già in parte presentate nel capitolo precedente). Le procedure messe a punto vengono poi utilizzate in configurazione dinamica.

4.1 Prove statiche

4.1.1 La fase di presa

La configurazione in laboratorio per la prova statica è presentata in Figura 4.1, dove si può notare la diversa inclinazione dei due piani delle camere, il deposito nella zona di accumulo e le otto camere sull'impalcatura pronte per l'acquisizione. Questa prova statica aveva solo il fine di capire quale fosse la configurazione migliore delle telecamere, dove e quanti target andassero posizionati e scegliere il processo di acquisizione migliore che unisse buoni risultati a velocità di elaborazione.

La serie di immagini raccolte (Figura 4.2) e successivamente elaborate sono state prese a deposito fermo con le telecamere disposte al di sopra della canaletta intorno al deposito in modo da assicurare una copertura tra i fotogrammi maggiore del 60%. Al fondo della canaletta sono stati posizionati i target retroflettenti in numero sufficiente da facilitare il processo di triangolazione. Questi devono risultare ben visibili e riconoscibili possibilmente in tutti i fotogrammi. È stato tracciato un sistema di riferimento locale sul piano di valle della canaletta, che rimarrà costante per tutte le prove successive, costituito dagli assi di riferimento cartesiani X,Y di lunghezza nota pari a 11,6 cm.

4.1.2 Fase di orientamento

Avendo già a disposizione la calibrazione delle camere quello che ora serve è rilevare i target retroflettenti come GCP con il software Australis. In questo modo si eliminano lunghe e tediose misurazioni manuali con il teodolite e si ha comunque una stima accurata dei GCP. Quindi, una volta settato il progetto e inseriti i parametri di orientamento interno fondamentali delle camere, ovvero risoluzione, dimensione dei pixel e lunghezza focale, si può procedere all'importazione delle immagini (Figura 4.2). Australis è in grado di calcolare le coordinate di qualsiasi punto all'interno dello spazio di acquisizione dell'immagine, partendo proprio dai target retroflettenti, purchè il punto sia stato ripreso da diverse prospettive e angolazioni. Questo permette una prima stima dei parametri di orientamento esterno, che descrivono

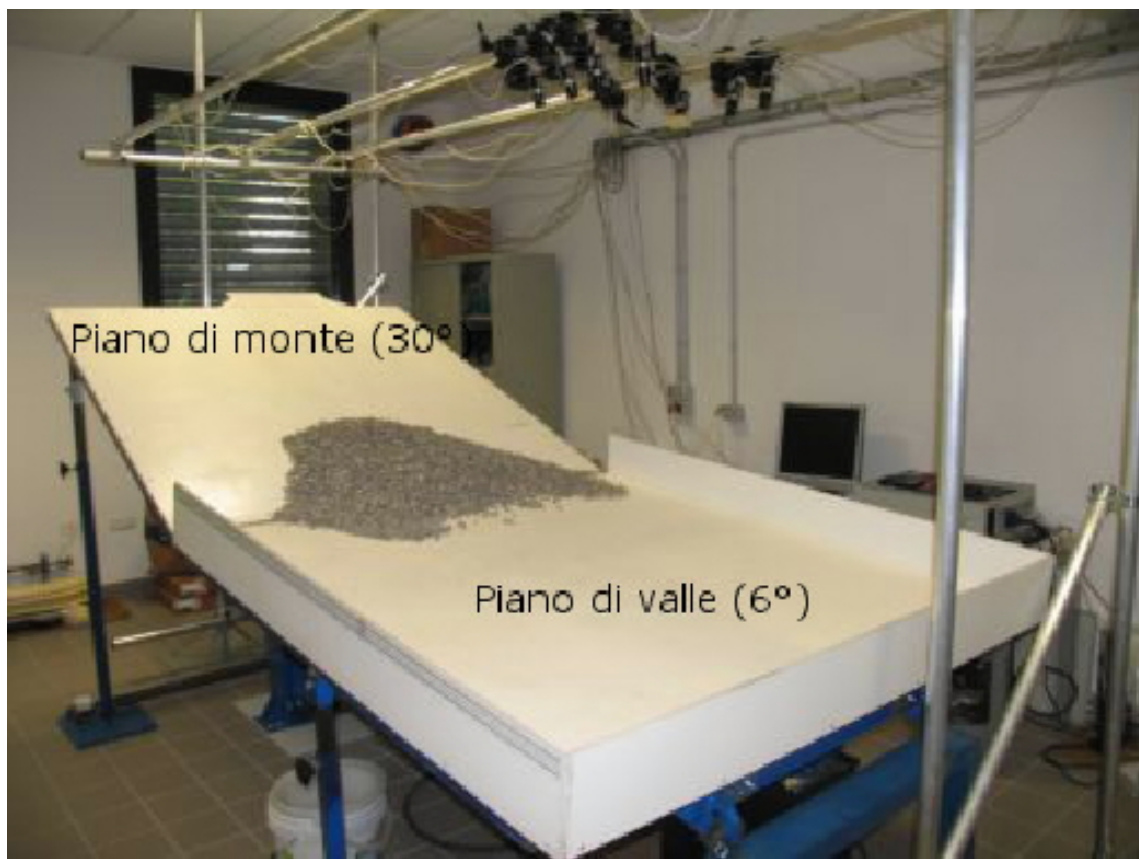


Figura 4.1: Assetto sperimentale adottato in laboratorio per la prova statica

il posizionamento della macchina fotografica digitale rispetto ai punti oggetto. Da questo punto in poi le altre operazioni che vengono svolte servono ad ottimizzare i risultati e a minimizzare gli errori sulle coordinate dei GCP. La triangolazione, raggiungibile attraverso il comando *Photogrammetry/Auto-Reference*, è il processo utilizzato per descrivere i punti nelle 3 dimensioni. Può essere eseguita solo dopo che l'orientamento preliminare della camera fotogrammetrica è stato eseguito. Attraverso la triangolazione si possono descrivere matematicamente i raggi che passano attraverso il punto immagine e arrivano al corrispondente punto oggetto, da più immagini. Il bundle block adjustment [*Photogrammetry/Bundle*] non fa altro che considerare le coordinate dei punti, ottenute dalle diverse immagini, simultaneamente in un blocco unico, considerando sia le equazioni di collinearità che i parametri addizionali. Questi permettono di eliminare gli errori sistematici. Come risultato finale si ha a disposizione un numero più o meno grande di punti (dipendente dal numero di target posizionati intorno al deposito) con le relative coordinate oggetto, partendo solo dalle immagini acquisite dalle camere. La Figura 4.3 illustra la posizione delle camere e i target riconosciuti utilizzando gli strumenti grafici (3DViewer) di Australis.

Una volta ottenute le coordinate dei GCP queste sono esportabili in un file.txt e utilizzabili in altri programmi.

Il report, in Figura 4.4, oltre ad assegnare ad ogni GCP le coordinate *XYZ* associa ad ogni coordinata uno *Standard Errors* e calcola per le coordinate *XY* il valore di RMS in μm . L'RMS non rappresenta altro che l'errore residuo definito dalla seguente formula:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Vx_i^2 + Vy_i^2)}. \quad (4.1)$$

Nelle elaborazioni successive è stato scelto di utilizzare solo GCP con $RMS \leq 0,3 \mu\text{m}$.

4.1.3 Sviluppo fotogrammetrico con Leica Photogrammetry Suite

Per l'analisi fotogrammetrica spinta è stato scelto di utilizzare il programma fotogrammetrico ERDAS (*Leica Photogrammetry Suite*) che dalle immagini riprese fornisce un 3D e delle ortofoto utilizzabili per i nostri scopi. Le operazioni di seguito possono essere eseguite sia dal menù a tendina della barra delle applicazioni del programma sia dalle icone presenti sulla stessa barra.

Dopo aver lanciato il programma LPS si crea un nuovo blocco di lavoro. Il file creato ha estensione .blk. Viene richiesto di settare il tipo di camere utilizzate: nel nostro caso *camere digitali non metriche*.

Altra accortezza da prendere all'inizio del progetto è la scelta del sistema di coordinate. Nel nostro caso, essendo un sistema di riferimento interno alla canaletta, quindi locale, viene impostato un [*Set LSR (unknown) Projection*] come proiezione.

Selezionando la voce next si apre una finestra con le informazioni generali sull'orientamento della fotocamera. Sono richiesti il sistema di rotazione utilizzato (si seleziona la voce *Omega, Phi, Kappa*), l'unità di misura degli angoli (gradi sessagesimali) e la direzione della foto identificata dall'asse perpendicolare all'immagine. Selezionare l'opzione che prevede l'asse *Z* come perpendicolare all'immagine. È inoltre richiesta la quota di volo, pari, nel nostro caso alla distanza tra le camere e il deposito (1,5 m). Da questa finestra si possono poi importare i dati di orientamento esterno [*ImportExteriorOrientationParameters*].

Successivamente vanno inserite le immagini, che devono essere in formato .tif e in bianco e nero, attraverso il comando [*Add Image*] dal menù *Edit*. Dallo stesso menù, si seleziona la voce [*Compute Pyramid Layer*] che realizza una costruzione a piramide che rappresenta i diversi tempi di analisi. Ciascun livello della piramide è costituito da una decrescente risoluzione spaziale. Questo processo velocizza il confronto tra le diverse immagini. La finestra del programma presenta i rettangoli accanto alle immagini di colore rosso o verde dipendentemente da quali operazioni sono state svolte o meno. Ora tranne quello della *Pyramid Layer* di colore verde, gli altri rettangoli sono rossi come mostrato in Figura 4.5. Ora, dal menù *Edit* tramite il comando [*Frame Editor*], ad ogni immagine vanno assegnati i seguenti valori:

- Sensor: richiede l'inserimento dei valori della focale e le coordinate del punto principale determinati precedentemente con Australis. Nel caso in cui le camere non fossero state calibrate precedentemente, si sarebbero potuti inserire i valori approssimati (focale corrispondente al tipo di obiettivo scelto e coordinate del punto principale pari a zero);
- Interior: richiede l'inserimento del pixel size lungo le direzioni *X, Y*. Per noi i pixel sono quadrati, di grandezza $4,4 \mu\text{m} \times 4,4 \mu\text{m}$;

- Exterior Information: richiede l'inserimento dei parametri di orientamento esterno della macchina fotografica da inserire manualmente o importare. Nel nostro caso li lasceremo incogniti. Il programma, attraverso l'elaborazione delle immagini, restituirà i parametri di orientamento esterno delle camere.

Attraverso il [*Point Mesurament Tools Classic*] dal menù *Edit* si inizia a lavorare sulle immagini del progetto. Viene visualizzata una finestra divisa a metà nella quale per ogni metà è mostrata un'immagine a tre livelli di ingrandimento, come mostrato in Figura 4.6. Nella parte in basso vanno inseriti i punti d'appoggio attraverso il pulsante *add* che aggiunge delle caselle vuote. Queste caselle sono divise in nove campi: Point ID; Description; Type; Value; Active; X; Y; Z. Vanno aggiunte tante caselle quanti sono i punti d'appoggio da importare. Una volta create tutte le celle e selezionate, attraverso il comando [*Import*], vanno importati i GCP calcolati con Australis. Successivamente si procede al riconoscimento manuale di tutti i punti d'appoggio su tutte le immagini del progetto. Attraverso l'utilizzo del mirino si seleziona, sulla finestrella dell'ingrandimento maggiore, il punto corrispondente al GCP. Quest'operazione va ripetuta su tutte le foto, cambiando le foto visualizzate nelle due metà della finestra attraverso l'apposito menù a tendina. Dopo l'inserimento di alcuni GCP attraverso l'uso del mirino, evidenziato dal rettangolo nero in Figura 4.6, possiamo, una volta inserito il GCP in una foto, trovarlo automaticamente anche nelle altre in base alle coordinate del punto d'appoggio inserite. Se il puntatore va a finire automaticamente su un punto lontano al punto di reale corrispondenza possono esserci errori nei parametri di orientamento inseriti o nei punti d'appoggio inseriti in precedenza. Durante le varie elaborazioni si è notato come il programma, se le immagini riprese sono tutte alla stessa altezza e con angolazioni simili, sia facilitato nel riconoscere i punti automaticamente con maggior precisione. Per questo nelle fasi successive si sono dovute eliminare alcune foto. Una volta inseriti tutti i GCP si procede ad una prima triangolazione. Il risultato della triangolazione ci dà una misura di quanto la stima dei GCP di Australis sia buona. La triangolazione permette di avere un primo calcolo dei parametri di orientamento esterno, di tutte le camere, che prima erano sconosciuti. L'inserimento successivo dei Tie Point, punti comuni a tutte le immagini le cui coordinate però non sono note, avviene in parte manualmente e in parte automaticamente. Il riconoscimento automatico è facilitato in immagini con contrasto cromatico elevato. Per questo motivo parte del materiale costituente il deposito è stato colorato di bianco. I tie points vanno inseriti in modo uniforme sul deposito, devono, possibilmente, essere punti comuni a molte o tutte le foto e devono essere facilmente riconoscibili. Ovviamente per poter inserire i punti bisogna aggiungere caselle vuote come visto per i GCP.

Sulla base dei tie point inseriti manualmente e dei GCP per via automatica, attraverso il pulsante [*Automatic Tie Point Generation*] mostrato in Figura 4.7, vanno settati i seguenti criteri di ricerca:

- Search size: prima di realizzare l'identificazione dei punti delle immagini, il programma calcola la posizione approssimata dei punti nell'area di sovrapposizione. Dopo aver fatto questo viene eseguita la ricerca del punto corrispondente all'interno di una finestra. Per le zone con differenze topografiche marcate è raccomandato un valore elevato della finestra di ricerca;
- Correlation size: rappresenta la dimensione in pixel della finestra per eseguire la correlazione. Per aree caratterizzate da variazioni topografiche minime e da basso contrasto cromatico si può aumentare il valore di default (pari a 7×7);
- Least square size: questa tecnica è utilizzata per garantire la qualità dei punti approssimativamente entro 0,1– 0,2 pixel. Il least square size rappresenta la dimensione della finestra all'interno della quale viene applicata la tecnica. Per aree con dislivelli minimi può essere usato un grande valore e viceversa;
- Feature Point Density: durante l'estrazione dei punti in comune il programma determina punti che hanno grandi variazioni del livello di grigio per pixel posti in vicinanza. Il programma calcola automaticamente la densità di tali punti all'interno dell'area di sovrapposizione. Per aree con poco contrasto di livello di grigi è consigliato un elevato valore della densità (superiore al 100%);
- Correlation limit: rappresenta il valore limite inferiore di correlazione che è accettato. Può variare tra 0,6 e 0,99. Il valore di default è 0,7. Un valore inferiore consente una maggior correlazione di punti, ma minor precisione, e viceversa. Dopo aver calcolato il valore del coefficiente di correlazione tra una coppia di punti, esso viene messo a confronto con il valore del coefficiente di correlazione limite. Se risulta essere inferiore allora il punto non viene considerato comune. Un elevato valore

del coefficiente di correlazione limite può portare ad una buona correlazione, ma al riconoscimento di pochi punti;

- Initial accuracy: definisce la qualità minima necessaria dei valori di ingresso. I parametri di orientamento esterno e le coordinate dei punti di appoggio devono avere un'accuratezza del 25% rispetto al valore reale. Un valore maggiore aumenta l'area di ricerca dei punti in comune. Se la precisione e l'accuratezza iniziale sono bassi allora è consigliabile un valore maggiore rispetto a quello di default.

Questa funzione individua con buona precisione molti punti comuni alle varie foto. Se l'immagine presenta delle ombre può essere attivata l'impostazione Avoid Shadow che consente di escludere le zone in ombra dalla ricerca dei tie points. Dopo aver inserito i coefficienti si seleziona *Run* che dà inizio al processo di estrazione dei punti.

Sulla base dei punti trovati si può procedere al processo di triangolazione attraverso il pulsante [Aerial Triangulation], mostrato in Figura 4.8, nel quale vanno settati i seguenti campi:

- General: dove si impostano numero delle iterazioni, valore di convergenza e l'unità di misura delle coordinate dei punti immagine per il report;
- Point: dove si imposta la deviazione standard dei punti immagine lungo le coordinate X, Y, Z . Si deve valutare l'errore che può essere stato commesso durante la fase di presa dei punti. Essendo le camere fissate all'impalcatura e sempre nella stessa posizione si può considerare tale valore costante per tutte le prove realizzate;
- Interior: si deve impostare la deviazione standard di lunghezza focale, e delle coordinate del punto principale. Si ha inoltre la possibilità di mantenere i valori fissi o meno. A questi valori si può attribuire una deviazione standard bassa poiché sono stati accuratamente calcolati con Australis;
- Exterior: dove si imposta la deviazione standard delle coordinate della camera X, Y, Z e degli angoli Ω, Φ, κ . Per questi valori si ha un errore maggiore in quanto i parametri devono essere determinati attraverso l'uso di questo programma e quindi si imposta un valore costante per tutte le grandezze;
- Advanced Option: nella quale va fissato il metodo di stima dei parametri addizionali. Si è optato per il modello fisico di Brown che utilizza 14 parametri aggiuntivi.

L'iterazione è fatta in due tentativi. Nel primo tentativo si applica il processo di Blunder Checking Model, che consente di eliminare i punti di appoggio che contengono degli errori nella misura delle coordinate e che quindi possono portare dei problemi per la convergenza, mentre si fanno variare i parametri di orientamento interno ed esterno secondo la loro deviazione standard. Nel secondo tentativo si inseriscono anche le deviazioni standard dei punti di appoggio dopo aver eliminato quei punti che causavano problemi di convergenza. Tutti i valori di deviazione standard devono essere inseriti in modo da minimizzare il valore dell'errore RMSE che compare in seguito alla convergenza del processo. Affinché il processo converga è necessario far variare, inizialmente, solo i valori delle coordinate dei punti di appoggio e dei parametri di orientamento esterno e mantenere fissi quelli di orientamento interno. Quando il processo converge con bassi valori del valore di RMSE (circa 1 – 2 al massimo) allora si possono far variare anche i valori dei parametri di orientamento interno. Dopo la triangolazione è possibile avere un *Report* in cui sono sintetizzati i risultati del processo. Si possono verificare i valori dei residui dei punti di appoggio, di orientamento intero ed esterno. Se tali valori risultano essere soddisfacenti, ossia se la differenza tra i valori stimati e quelli misurati è piccola, allora si possono accettare i risultati selezionando le voci update e accept dalla finestra della triangolazione aerea. In caso contrario si provano le diverse combinazioni di variazione dei parametri finché la soluzione non è quella desiderata.

Sulla base della nuvola di punti calcolata il programma permette di sviluppare un DEM (Digital Elevation Model) e successivamente la creazione di ortofoto. Attraverso il menù *Process* si sceglie il comando [*DEM extraction*] e sono richiesti i seguenti parametri:

- Output Type: si può scegliere tra i formati DEM, che crea un file di estensione .img, caratterizzato dall'aver una maglia quadrata, visualizzabile sia con il Viewer di ERDAS che con ArcView, ASCII, che crea un file di coordinate oggetto x, y e z di tutti i punti estrapolati, genera un file di estensione .dat, il formato TIN (Triangular Irregular Network) con estensione .wcs e uno shapefile con estensione .shp che può essere caricato con ArcView;

- Cell Size: lungo x e y di output del DEM. Il valore di default che compare può essere rimpicciolito fino ad un valore limite inferiore che è funzione del tipo di immagine che si sta elaborando. Da questo valore dipende il numero di punti che costituiscono il DEM
- Advanced Properties: nella quale si setta la strategia nella correlazione tra i punti a seconda delle proprie esigenze. L'opzione Topographic Type permette di dare una descrizione generale del tipo di terreno. Le scelte sono tra Flat per aree di pianura, Rolling Hills per zone con bassi dislivelli e Mountainous per dislivelli elevati. Il programma utilizza queste informazioni per selezionare i parametri interni per l'estrazione del DTM.

Inoltre nelle impostazioni si può specificare che assieme al DTM venga prodotto un contour, cioè uno shape file contenente le curve di livello del modello stesso. Ultima cosa, ma non meno importante, l'applicazione permette di scegliere che parti delle immagini si vuole prendere in considerazione per la ricostruzione tridimensionale di modo da poter già scartare le parti non utilizzate.

4.1.4 Il programma AgiSoft PhotoScan Professional Edition

Il programma [25] permette di importare le immagini attraverso il comando [*Workflow/Add Photos*] il quale apre una finestra di dialogo nella quale si possono selezionare le foto. Il passo successivo è quello di importare i GCP, determinati con Australis, nel progetto. Selezionando [*View/ Ground Control/ Import*] viene aperto il file precedentemente creato. Deve essere un file .txt che contiene il nome della camera e le sue coordinate separate dal Tab. Per poter importare le coordinate bisogna che il nome dell'immagine corrisponda perfettamente a quello della camera nel file. Nel pannello *Ground Control* va aperta la finestra di dialogo *Settings* nella quale va settato il sistema di coordinate. Nel nostro caso *Local Coordinates*. Dal menù [*Workflow /Align Photos*] si perfeziona la posizione della camera corrispondente ad ogni foto e si costruisce la nuvola di punti. In questo modo la nuvola di punti che si crea parte dalla conoscenza della posizione delle camere a noi nota e quindi risulta più precisa. Successivamente vanno inseriti i markers, cioè i GCP, precedentemente determinati con Australis. Prima però è necessario ricostruire la geometria del corpo attraverso il comando [*Workflow/ Build Geometry*]. Il processo dura qualche secondo. Attraverso il comando *Create Marker* su ogni foto è possibile zoommare e segnare il punto corrispondente al GCP. Grazie all'aiuto dei target retroflettenti, ben visibili e facilmente riconoscibili in Australis, questo procedimento è abbastanza rapido. Di questi punti vanno importate le coordinate X, Y, Z come fatto in precedenza per le coordinate delle camere. Si può ottimizzare il Photo Alignment attraverso [*Ground Control/ Optimize*] e mantenendo selezionati solo i GCP di cui le coordinate si pensano più affidabili (si è scelto quelle con $RMS \leq 0,34$). In Figura 4.9 viene mostrata la nuvola di punti calcolata e la posizione delle camere risultato dei processi fino qui descritti. Una volta scelti i GCP più affidabili si ripete la costruzione del modello 3D attraverso [*Workflow/ Build Geometry*]. È un processo che richiede tempo e il risultato dipende dalla risoluzione e qualità delle foto scelte e dalla precisione dei target. Siccome il programma quando produce il modello 3D cerca di riprodurlo con un'eccessiva risoluzione geometrica, è possibile attraverso il comando [*Tools/ Decimate Mesh*] determinare la quantità di faccie che devono andare a costituire il modello finale. È consigliato mantenere il numero delle faccie al di sotto di alcuni milioni. Inoltre, per evitare la generazione di eventuali ortofoto con buchi si può utilizzare da [*Tools/ Close Holes*] e nella finestra di dialogo va settata la dimensione del più grande buco da chiudere (espresso come percentuale sulla grandezza totale del modello). Ora il passaggio mancante è creare la texture attraverso [*Workflow/ Build Texture*] e specificando come Mapping Mode l'Ortofoto e come Blending Mode il Mosaic. Dopo queste operazioni si può passare alla creazione di ortofoto e DEM. Per quanto riguarda l'ortofoto questa è facilmente esportabile dal menù [*File/ Export Orthophoto*] ed un esempio è mostrato in Figura 4.10. Come si può notare nelle zone dove la nuvola di punti è meno fitta la qualità dell'ortofoto risulta più scadente.

La generazione del DEM automatica non è delle migliori per cui anche in questo caso si è optato per esportare i punti ed elaborarli in GIS, poiché precedentemente in ambiente GIS si era creato il piano della canaletta attraverso i target retroflettenti posizionati sulla canaletta stessa. In questo modo si ha già un ambiente di lavoro attorno al deposito, visto che a causa del contenuto numero di foto disponibili per ogni istante il programma ricostruisce la nuvola di punti sul deposito e non riesce a caratterizzare con la stessa precisione tutta la canaletta.

4.1.5 Elaborazione del modello 3D attraverso l'uso di ArcGis

Una volta settato un nuovo progetto in ArcMap, per importare i punti nel GIS risulta necessario manipolare il .txt utilizzando ad esempio Excell o lo stesso Blocco Note. Nel file vanno inserite nella prima riga di ciascuna colonna le coordinate X, Y, Z . Questo risulta necessario perché il programma possa riconoscere automaticamente a quali coordinate corrispondono le tre colonne di dati. Attraverso il comando [*Tools/Add XY*] i punti vengono facilmente importati. Successivamente è necessario convertirli in shape file per poterli utilizzare nella creazione del TIN e per poterli eliminare o modificare attraverso l' Editor [26]. Ad ogni punto è associato un codice e le sue coordinate X, Y, Z . Sulla base di questi punti è possibile, attraverso il *3D Analyst*, creare un TIN dalla feature classe appena realizzata. Un TIN (*Triangulated Irregular Network*) è un modo diverso, rispetto al DEM, di rappresentare la distribuzione delle quote della superficie. In particolare il TIN è un DEM a maglie quadrate irregolari. La scelta dei punti significativi può basarsi su vari metodi, così come il collegamento dei punti può avvenire secondo vari criteri (ad es. criterio di Delaunay) che assicurino la continuità della superficie. La superficie di ogni triangolo è definita dall'elevazione dei suoi tre vertici ed in genere è assunta piana. Il TIN successivamente può essere rielaborato con interpolazioni successive come il Kriging mostrato in Figura 4.11..

Durante l'elaborazione dei dati ci si è accorti come la nuvola di punti generata dal software Agi PhotoScan sia decisamente più densa e permetta di fare un TIN sul quale le misure di profili longitudinali e trasversali risultano più precise. Dal TIN, in Figura 4.12, si sono estrapolati un profilo longitudinale e un profilo trasversale (Figura 4.13).

L' altezza h (mm) e la lunghezza d (mm) sono riferite a un sistema di riferimento cartesiano X, Y , dove X e Y sono sul piano di valle della canaletta. Dai profili si può notare l'andamento del deposito. Questo andamento è qualitativo a causa del numero contenuto di punti sperimentali calcolati, ma le dimensioni del deposito di 80 cm \times 85 cm \times 4 cm risultano simili alle misure sperimentali condotte sul deposito di 82 cm \times 80 cm \times 5 cm. Il profilo longitudinale non deve trarre in inganno poiché nel tratto finale non chiude a zero. Questo è dovuto al fatto che non è stato possibile tracciare il profilo al di fuori del deposito visto che in base alla nuvola di punti il TIN creato caratterizza solo il deposito e non anche la canaletta e quindi il tratto finale non è apprezzabile. Inoltre la quota massima di 80 mm non si riferiscono al solo deposito che risulterebbe in questo caso di 4cm superiore al deposito misurato, ma al deposito che nella parte superiore è adagiato al piano di monte della canaletta e quindi ne falsa lo spessore.

4.1.6 Analisi dei risultati e valutazioni

La prova statica appena descritta e la prova descritta nel capitolo precedente effettuata allo scopo di capire le potenzialità dei software scelti e la miglior configurazione possibile da adottare in laboratorio ha messo in evidenza che:

- la numerosità comunque contenuta dei punti elaborati da entrambi i programmi è dovuta alle poche immagini utilizzabili visto che entrambi i programmi fotogrammetrici sopradescritti non elaborano bene immagini con angoli di ripresa troppo elevati. Da qui la necessità di scartare le immagini raccolte dalla cam 4 e dalla cam6 e eseguire le successive elaborazioni solo con 6 immagini;
- il confronto tra le dimensioni reali del deposito calcolate sperimentalmente e le misure sulle elaborazioni tridimensionali hanno messo in evidenza come il programma fotogrammetrico Agisoft PhotoScan sia affidabile.
- dal TIN si nota che i programmi costruiscono la nuvola di punti solo sul deposito e non riconoscono la geometria della canaletta;
- la nuvola di punti del software fotogrammetrico AgiSoft Photoscan risulta più fitta di quella calcolata con il Leica;
- l'elaborazione dei dati con il programma Leica risultata piuttosto macchinosa e lunga rispetto ad AgiSoft Photoscan.

Questo ha indotto a ritenere che per le elaborazioni dinamiche fossero necessarie alcune modifiche. La prima nella posizione delle camere che poste al di sopra della canaletta in fila una dietro l'altra non devono avere angolo di presa elevati ma invece devono mantenersi perpendicolari al piano di valle della canaletta. La seconda modifica riguarda la necessità di riuscire a caratterizzare meglio anche la canaletta nella sua

totalità, attraverso target e punti numerati sulla canaletta. Questo può essere fatto costruendo un TIN della canaletta vuota sulla quale successivamente importare la nuvola di punti calcolata, collocando, così, in modo preciso il deposito (Figura 4.14).

Infine la scelta sul software da utilizzare per la prova dinamica ricade su AgiSoft Photoscan. Questa scelta è basata sulle motivazioni sopra esposte maturate a seguito dell'esperienza durante la prova statica.

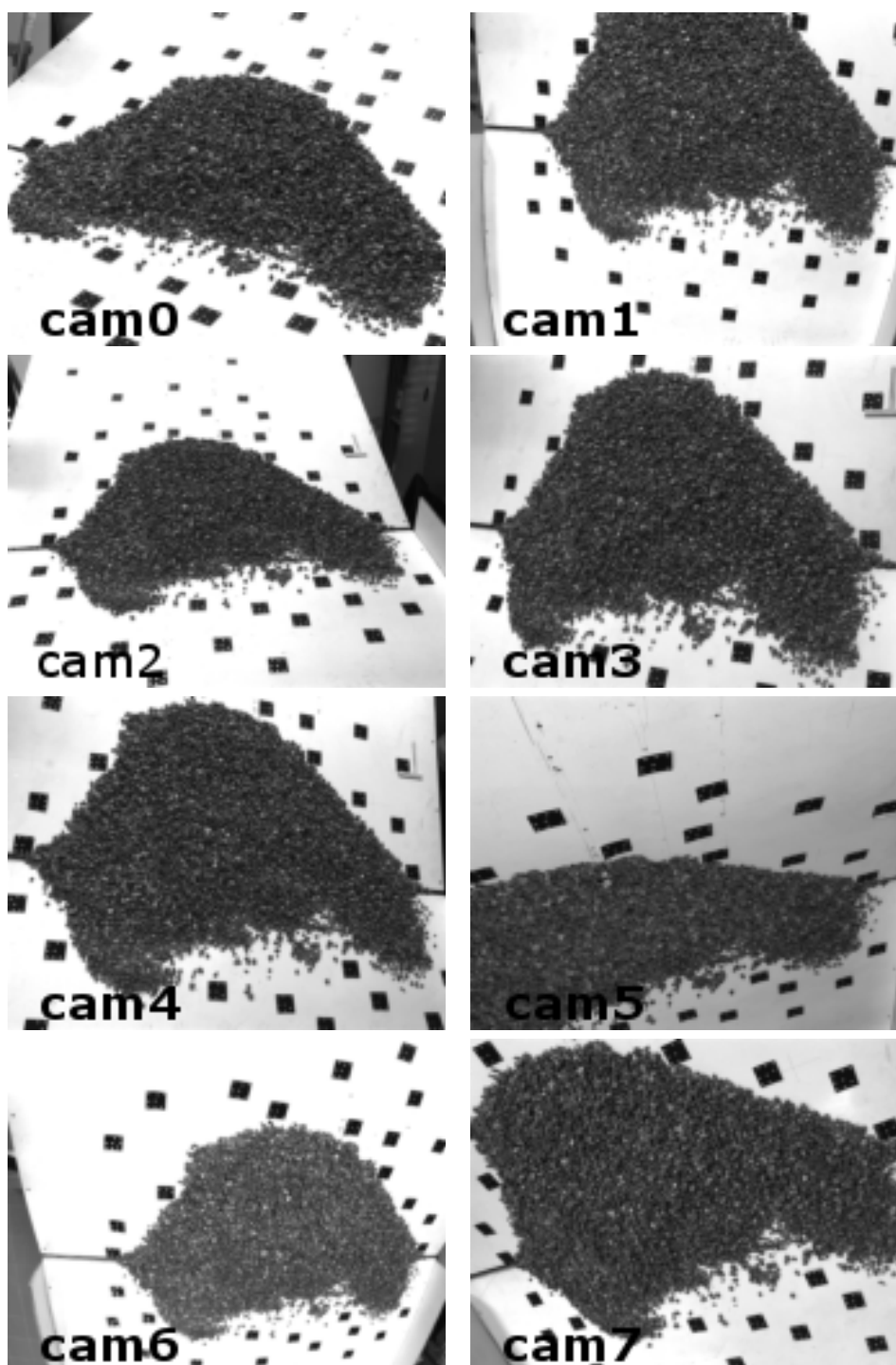


Figura 4.2: Fotogrammi ripresi dalle otto camere durante la prova statica.

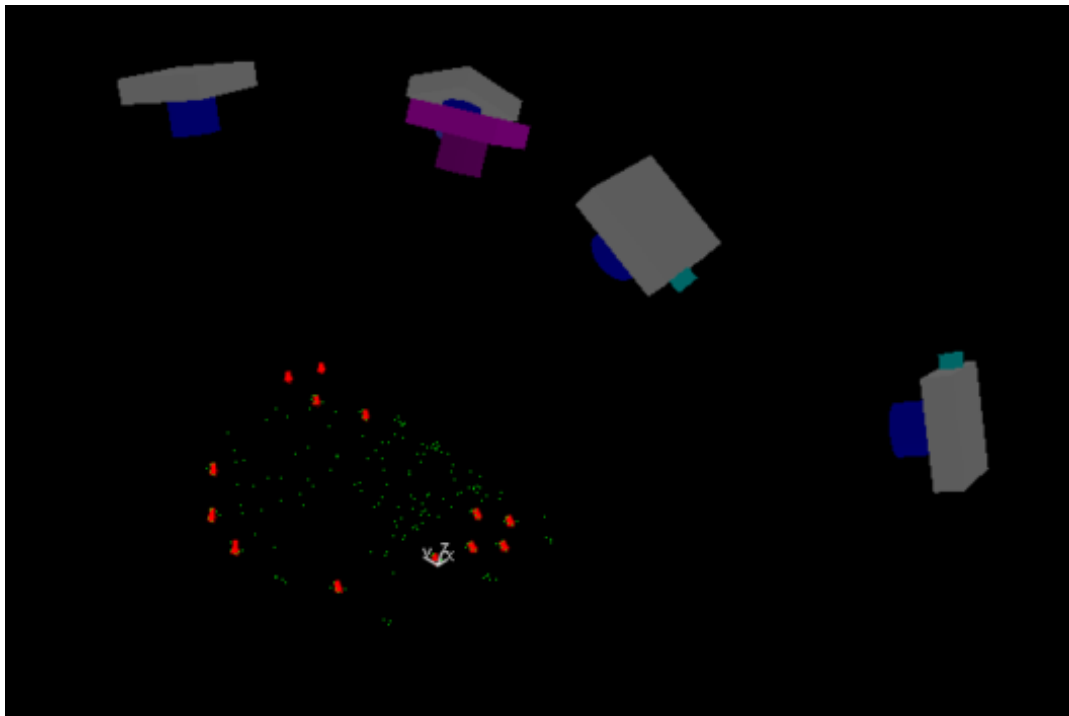


Figura 4.3: Ambiente 3DViewer nel quale si può vedere la posizione delle camere, la posizione dei target retroflettenti e il sistema di riferimento.

```

XYZ Points Summary (28/03/2012 16:48pm)
Project Name: C:\users\win7\Documents\universita\TESI\LEICA_PROJ\austr01.aus
    
```

Quick Summary
 Number of Points: 374
 Number of Images: 7

Sightings	Label	Point Coordinates			Standard Errors			RMS xy(µm)	Rays
		X	Y	Z	SX	SY	SZ		
	CODE17_B5	625.6656	768.9154	76.6795	0.0730	0.1170	0.1548	0.938	4
	CODE17	610.3624	763.8965	75.0436	0.0724	0.1167	0.1552	0.838	4
	CODE17_B10	599.7176	776.9152	80.0574	0.0721	0.1179	0.1553	0.747	4
	CODE44_B12	601.4524	558.0703	13.8488	0.0522	0.0614	0.1123	0.354	5
	CODE44_B2	591.3488	586.1112	23.5759	0.0520	0.0615	0.1120	0.482	5
	CODE44	587.0010	567.2925	17.6753	0.0523	0.0616	0.1123	0.650	5
	CODE44_4	586.6397	552.1961	13.4017	0.0525	0.0616	0.1125	0.560	5
	CODE44_B1	571.1525	580.2718	22.8929	0.0524	0.0619	0.1122	0.386	5
	CODE44_5	571.3911	565.8764	18.7312	0.0492	0.0643	0.0911	0.724	5
	CODE44_1	571.8416	551.4576	14.8085	0.0467	0.0612	0.0847	0.405	6
	CODE28_3	479.2342	866.0263	117.8867	0.0691	0.1734	0.1282	0.577	4
	CODE28_B7	472.5928	832.5894	107.3848	0.0689	0.1686	0.1278	0.402	4
	CODE28_B2	464.2763	866.5227	118.4120	0.0695	0.1736	0.1283	0.468	4
	CODE28	458.8478	847.6777	112.7958	0.0695	0.1710	0.1281	0.258	4
	CODE28_4	457.5929	832.8572	108.1544	0.0693	0.1688	0.1280	0.444	4
	CODE18_3	471.5317	646.4713	51.1584	0.0507	0.0630	0.0934	0.467	5
	CODE28_B14	443.9524	866.7595	120.2431	0.0701	0.1738	0.1284	0.390	4
	CODE28_5	443.2455	847.2202	113.9565	0.0699	0.1710	0.1282	0.388	4
	CODE18_B5	467.5856	632.3016	46.4548	0.0463	0.0560	0.0774	0.413	7
	CODE28_1	442.6589	833.0855	109.3667	0.0698	0.1690	0.1280	0.169	4
	CODE18_B2	456.6123	646.3318	50.9909	0.0464	0.0560	0.0775	0.563	7
	CODE18	452.0179	627.4231	45.7787	0.0484	0.0564	0.0827	0.356	6
	CODE18_4	451.4750	612.4519	41.0769	0.0467	0.0563	0.0776	0.482	7
	CODE18_B4	441.7003	645.8645	52.3213	0.0466	0.0561	0.0775	0.474	7
	CODE18_5	436.4480	625.9796	47.3123	0.0468	0.0563	0.0776	0.542	7
	CODE18_1	436.5305	611.8025	42.6683	0.0495	0.0632	0.0868	0.371	6
	CODE34_3	319.0535	751.0367	91.8590	0.0524	0.0656	0.0888	0.636	6

Figura 4.4: Esempio di file contenente le coordinate dei GCP esportabile da Australis.

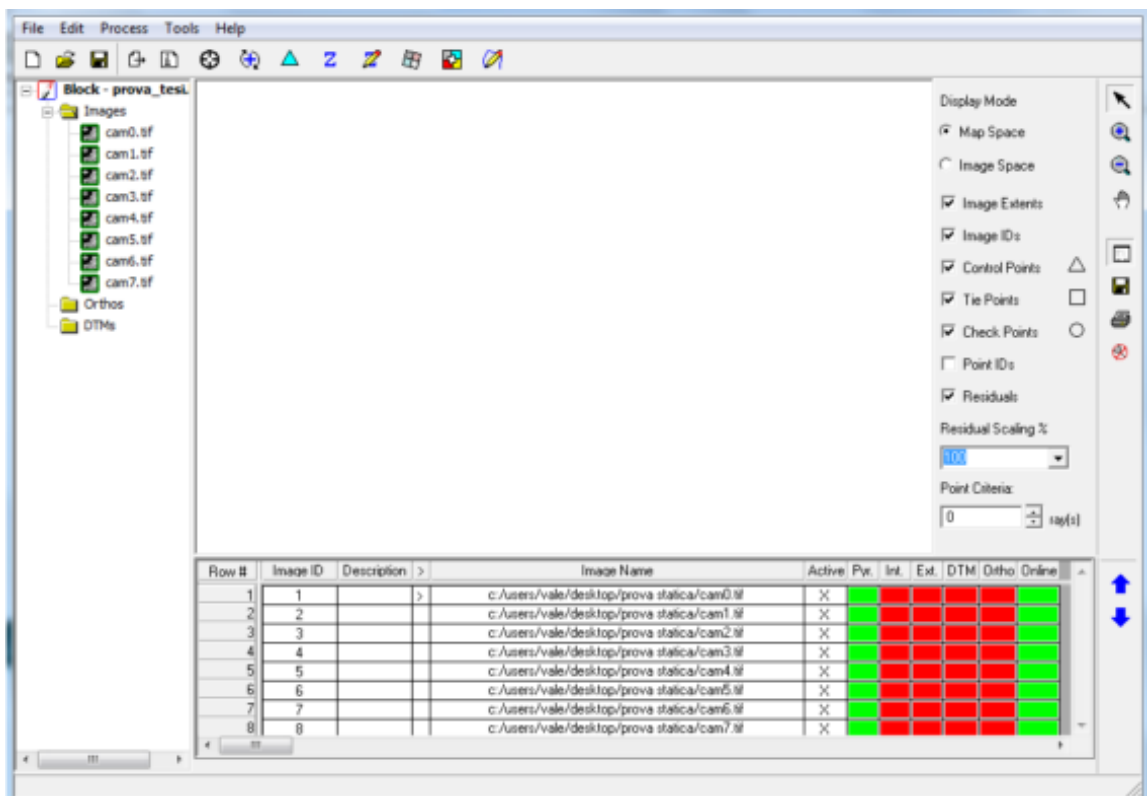


Figura 4.5: Interfaccia del programma Leica utilizzato per l'elaborazione delle immagini.

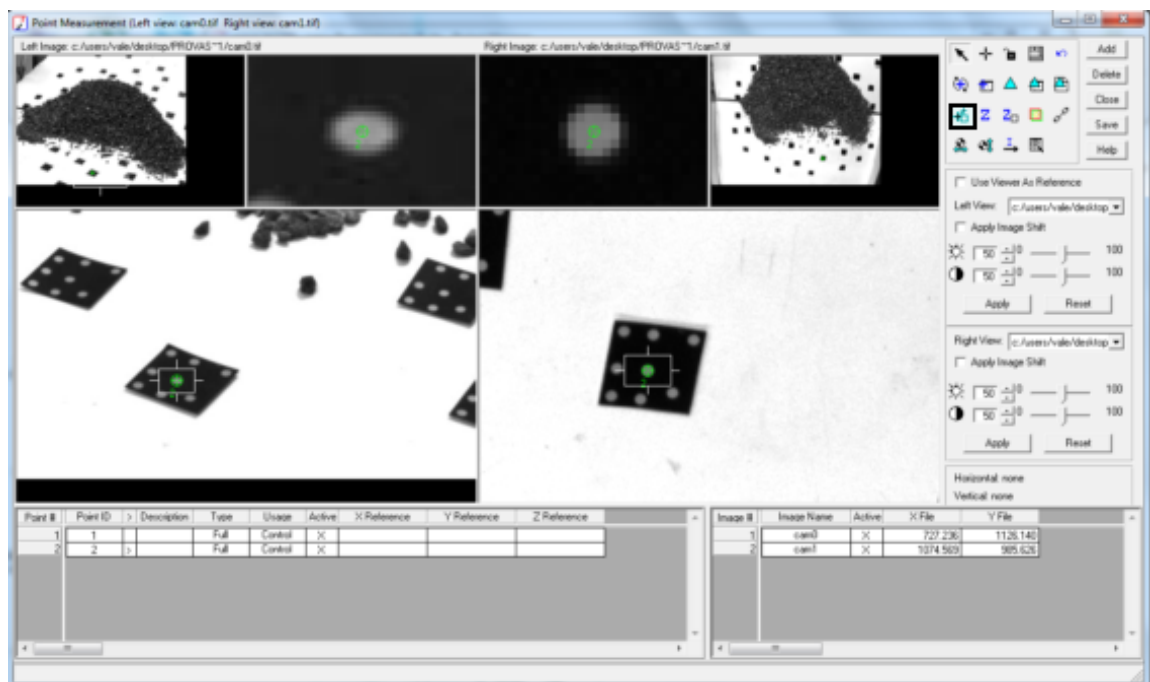


Figura 4.6: Inserimento di GCP con il mirino.

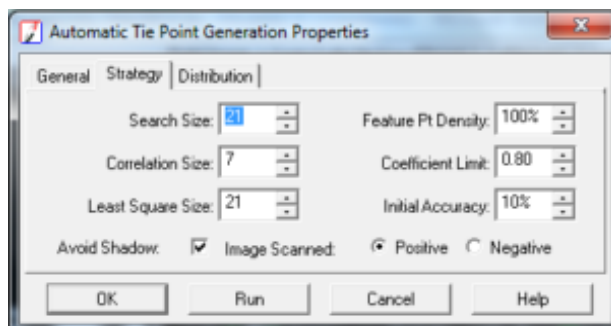


Figura 4.7: Finestra di dialogo della funzione Automatic Tie Point Generation.

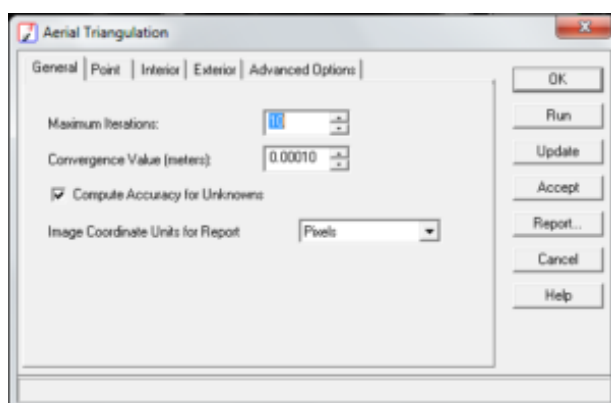


Figura 4.8: Finestra di dialogo della funzione Aerial Triangulation.



Figura 4.9: Generazione della nuvola di punti a seguito dell'allineamento delle camere.

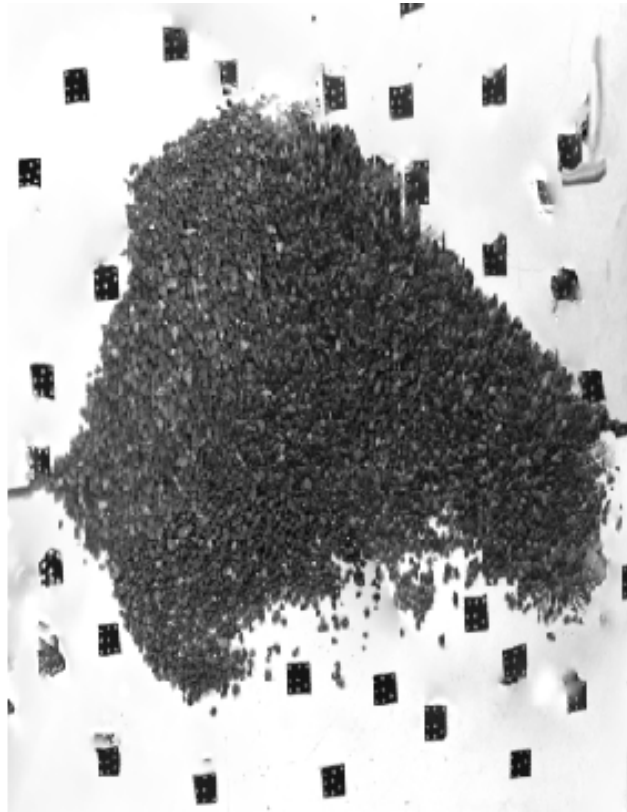


Figura 4.10: Esempio di ortofoto prodotta dal programma Agisoft PhotoScan

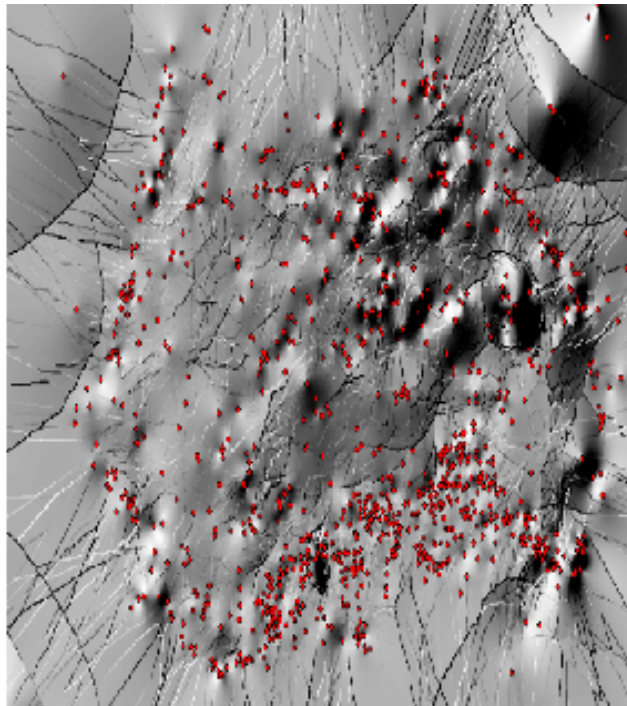


Figura 4.11: Kriging della prova statica con riportati al di sopra i punti sperimentali calcolati.

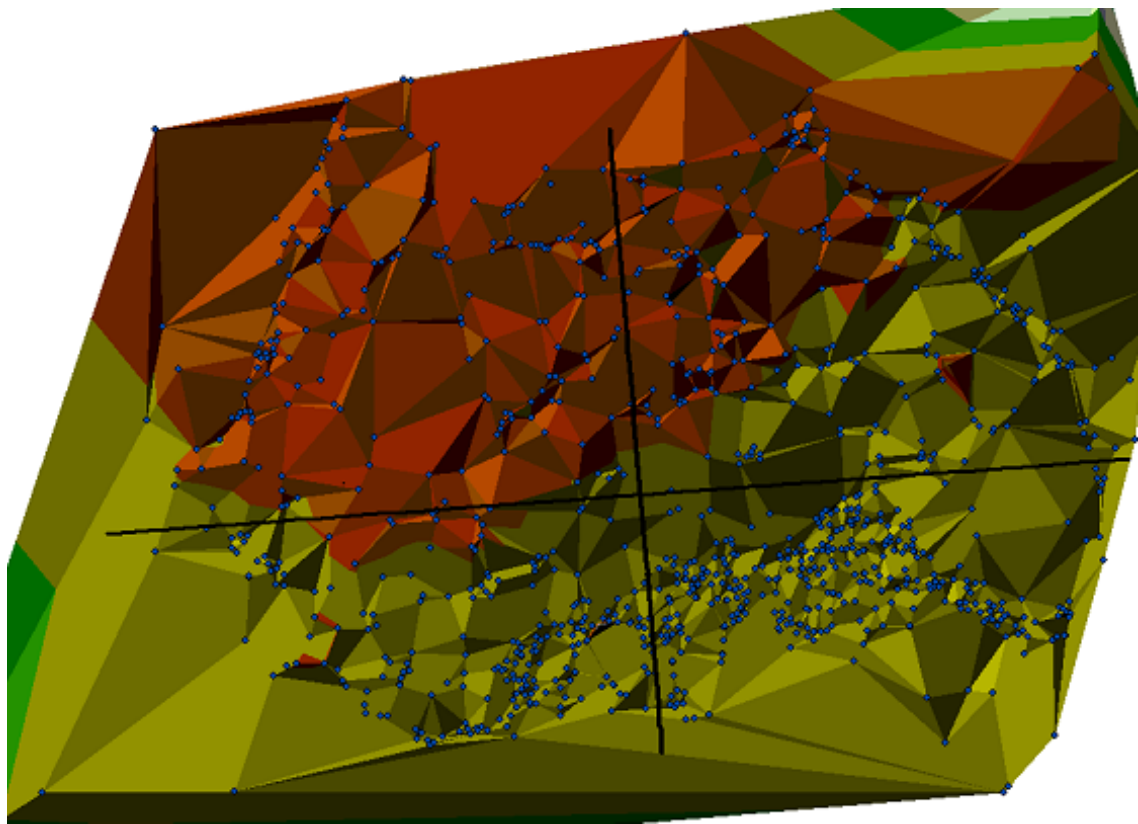


Figura 4.12: TIN prodotto dalla prova statica. Sopra riportate le tracce dei profili effettuati.

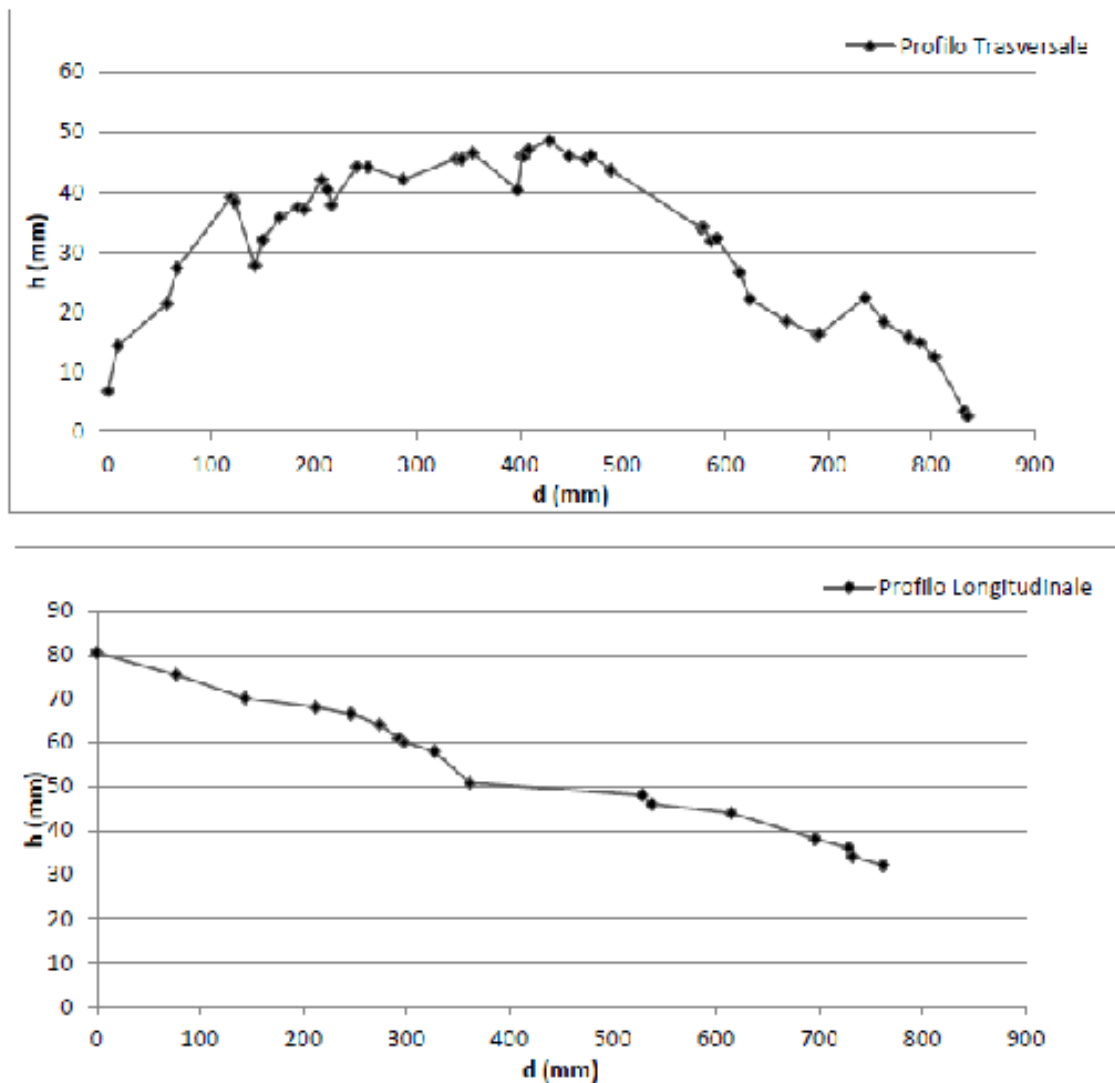


Figura 4.13: Profilo longitudinale e trasversale dell'ammasso granulare determinati a seguito dell'elaborazione fotogrammetrica e del TIN prodotto.



Figura 4.14: Canaletta in 3D elaborata in ambiente GIS attraverso l'uso di target retroflettenti e punti inseriti disegnati al fondo della canaletta.



Figura 4.15: Situazione al momento della prova dinamica: posizione delle camere e presenza sul piano di monte della canaletta per simulare il moto incanalato del materiale.

4.2 Prove Dinamiche

4.2.1 La fase di presa

Eseguire una prova dinamica significa acquisire, contemporaneamente con tutte le otto telecamere, alla frequenza di 20 Hz, durante la discesa dell'ammasso granulare incanalato come mostrato in Figura 4.15. Esposizione, diaframma e luci sono state precedentemente regolate. Visti i risultati dell'elaborazione delle prove statiche si è scelto di utilizzare, per calibrazione e determinazione dell'orientamento esterno delle camere, Australis. Per l'elaborazione fotogrammetrica si è scelto di abbandonare Leica e scegliere l'utilizzo di Agisoft PhotoScan. Siccome le camere sono posizionate in fila una dietro l'altra sopra la canaletta e quindi si ha una copertura, in percentuale, minore che nel caso della fotogrammetria statica, bisogna vedere come il programma risponde a questa variazione nel tipo di foto raccolta. Si è scelto di elaborare tre istanti rappresentativi della dinamica: in particolare si sono scelti i fotogrammi corrispondenti a $t = 1,35$ s (Figura 4.16), $t = 1,8$ s (Figura 4.17), $t = 2,5$ s (Figura 4.18).

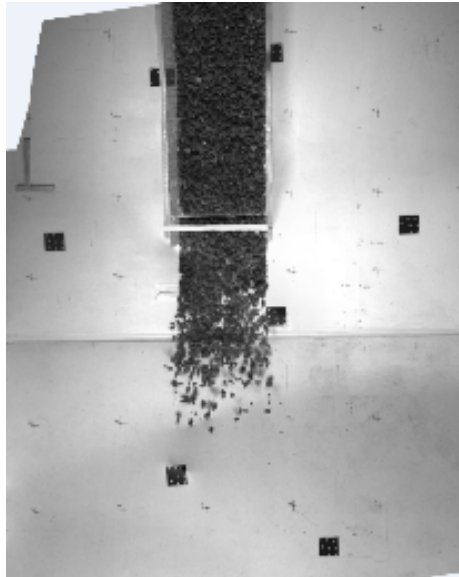
4.2.2 La fase di orientamento

I procedimenti spiegati per la fotogrammetria statica valgono anche per quella dinamica, fatta eccezione per l'*Auto-Reference*. In questo caso infatti, dopo aver creato il progetto e fissate i parametri di orientamento interno delle camere, precedentemente determinati, il programma data la scarsa sovrapposizione non riesce a georeferenziare le immagini da solo. Quindi sta all'operatore inserire manualmente i GCP necessari all'operazione. Dopo questa piccola perdita di tempo però il *Bundle Adjustment* ci restituisce con buona precisione i parametri di orientamento esterno delle camere. C'è da dire che questa operazione

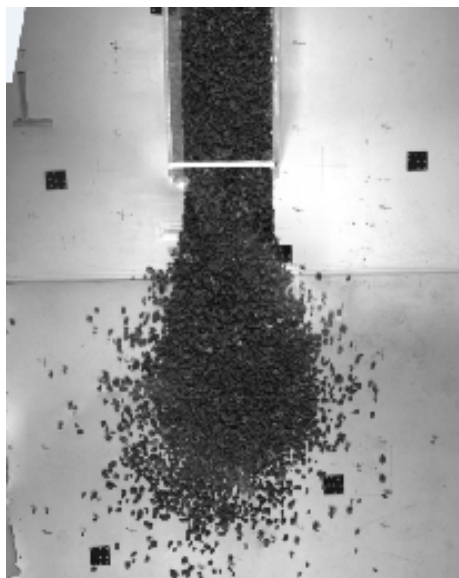
va ripetuta tra una prova e l'altra solo se varia la posizione delle camere o l'inclinazione dei piani della canaletta. In caso contrario si utilizzeranno sempre gli stessi parametri di orientamento interno, esterno e i GCP e quindi quello che ne risulterà sarà un processo speditivo.

4.2.3 Elaborazione fotogrammetrica con AgiSoft PhotoScan

Per la velocità nell'elaborazione della nuvola di punti si è deciso di elaborare le prove dinamiche solo con questo programma. I passaggi e comandi visti nell'elaborazione statica valgono anche per le elaborazioni dinamiche. Il programma oltre a permetterci di esportare la nuvola di punti per poi elaborarla in GIS, ci fornisce le ortofoto dei tre istanti elaborati (Figura 4.2.3, Figura 4.2.3, Figura 4.2.3).



Ortofoto elaborate dal programma AgiSoft PhotoScan per $t=1,35s$.



Ortofoto elaborata dal programma AgiSoft PhotoScan per $t=1,8s$.



Ortofoto elaborata dal programma
AgiSoft PhotoScan per $t=2,5s$.

In questo caso essendo le nuvole di punti prodotte più fitte che nel caso della prova statica, le ortofoto risultano più precise e con meno sbavature ai bordi, anche se queste sono presenti e sono dovute anche alla distorsione radiale di cui sono affette le immagini e quindi alla difficoltà maggiore che ha il programma fotogrammetrico di calcolare con precisione i punti ai bordi dell'immagine.

4.2.4 L'utilizzo di ArcGis

Per i tre istanti di tempo scelti ($t = 1,35s$, $t = 1,8s$, $t = 2,5s$) si sono elaborati dei TIN sui quali sono stati eseguiti profili trasversali (numerati da monte verso valle) e profili longitudinali.

Analisi dell'ammasso granulare a $t = 1.35 s$

Si è proceduto alla creazione del TIN mostrato in Figura 4.19. Al di sopra di esso si sono condotti tre profili trasversali mostrati in Figura 4.20. Questi profili fanno apprezzare il fenomeno incanalato al $t = 1,35s$ dove ancora gran parte del deposito è nella zona incanalata e il corpo si deve ancora espandere sul piano di valle. Proprio per questo non si sono condotti altri profili più a valle, come invece si è fatto per gli istanti successivi, visto che avrebbero rappresentato semplicemente il piano della canaletta con qualche picco dovuto a qualche sasso che rimbalzava in aria. Di questo fatto bisogna tener conto quando si ha a che fare con questi fenomeni in movimento poiché acquisendo a 20 Hz solo guardando le immagini si notano i sassi in aria e quindi nell'elaborazione del TIN bisogna fare attenzione ad eliminare eventualmente questi punti poiché andrebbero a falsare completamente il modello tridimensionale, a meno che la nuvola di punti non sia così densa e precisa da permettere di discriminare il singolo sasso. Si osserva per tutti e tre i profili che i punti sperimentali sono concentrati tra i 100 mm e i 300 mm questo è dovuto al fatto che il materiale è concentrato all'interno della canaletta larga per l'appunto 200 mm. Quello che appare chiaro è che sarebbe utile poter riconoscere le sponde della canaletta in modo più preciso, ad esempio attraverso punti riconoscibili lungo lo spessore superiore e target retroflettenti sulle sponde laterali e nel punto di raccordo tra la canaletta e il piano di monte. Infine essendo i profili condotti sul piano di monte e il sistema di riferimento giacente sul piano di valle le quote h in mm rappresentano la quota della canaletta in quel punto e il deposito al di sopra come si evince dai profili. Lo spessore del deposito nelle tre sezioni rimane all'incirca costante e si attesta intorno ai 20 mm. La costanza nello spessore è visibile anche nel profilo longitudinale in Figura 4.21.

Dal profilo inoltre si può osservare come sia evidente che il deposito non ha ancora iniziato ad interessare il piano di valle.

Infine dal modello tridimensionale riportato in Figura 4.22 si può apprezzare la nuvola di punti del deposito al di sopra della canaletta.

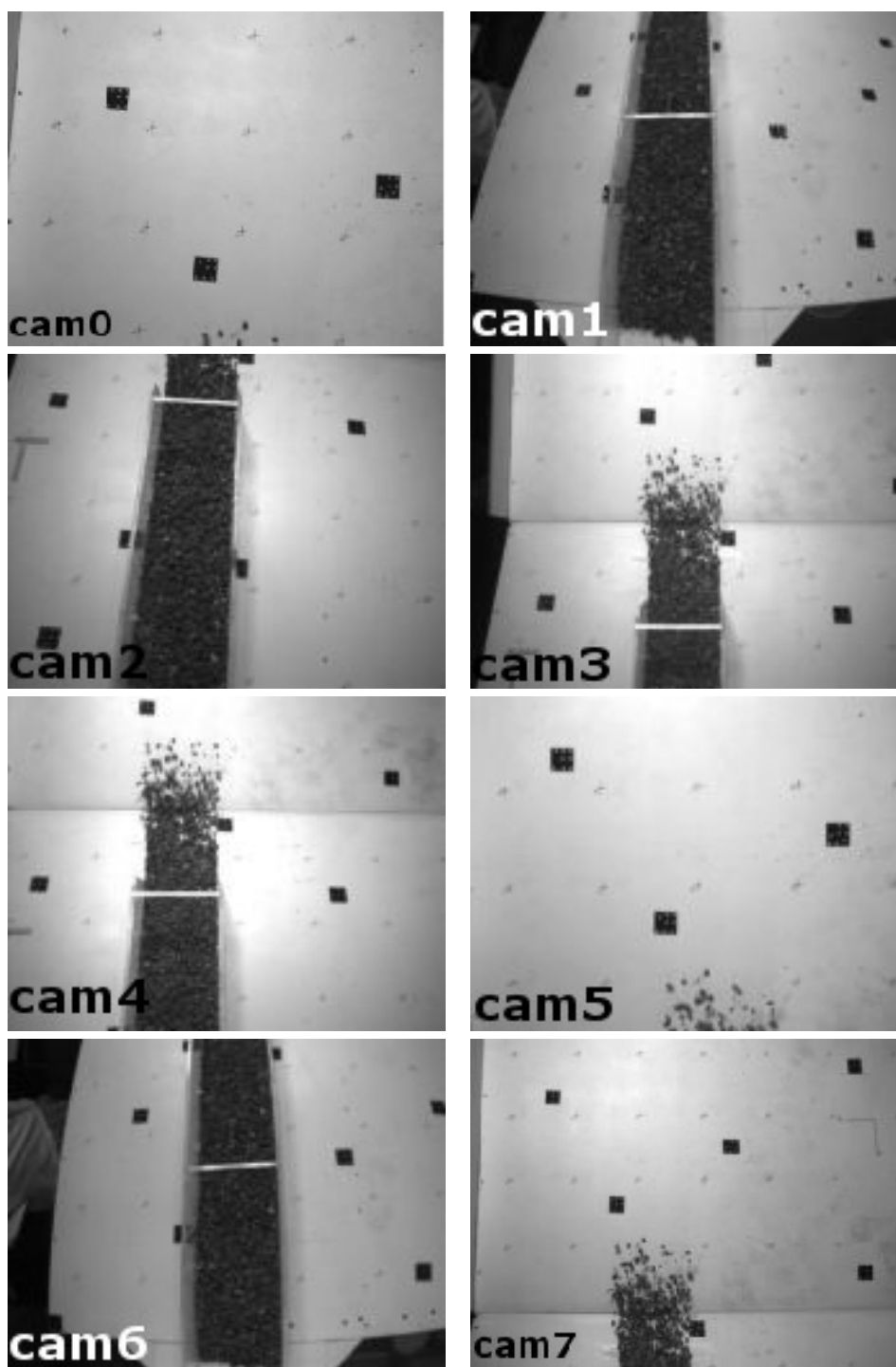


Figura 4.16: Fotogrammi ripresi dalle otto camere durante la prova dinamica al $t=1.35$ s.

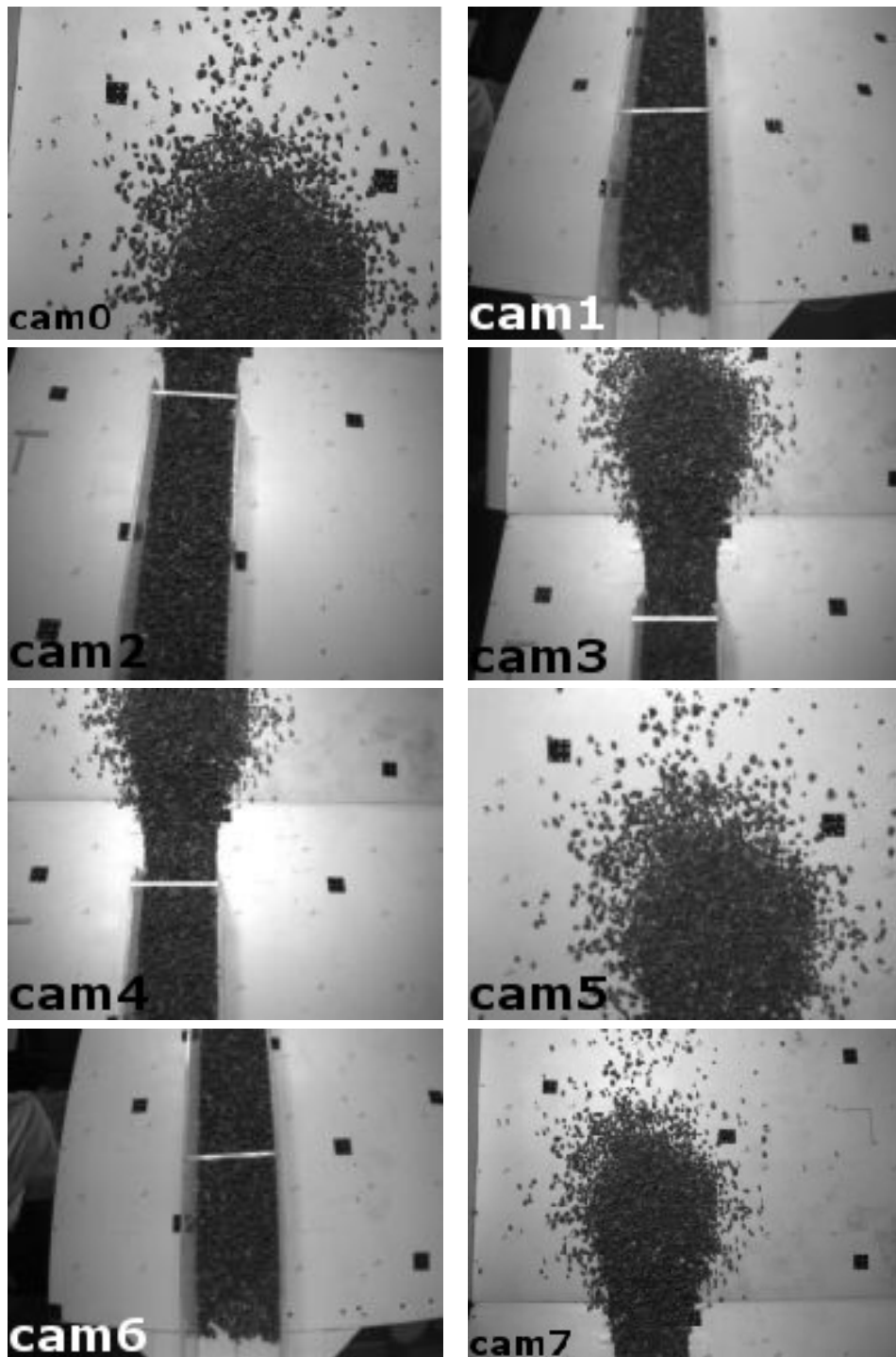


Figura 4.17: Fotogrammi ripresi dalle otto camere durante la prova dinamica al $t=1.8$ s.

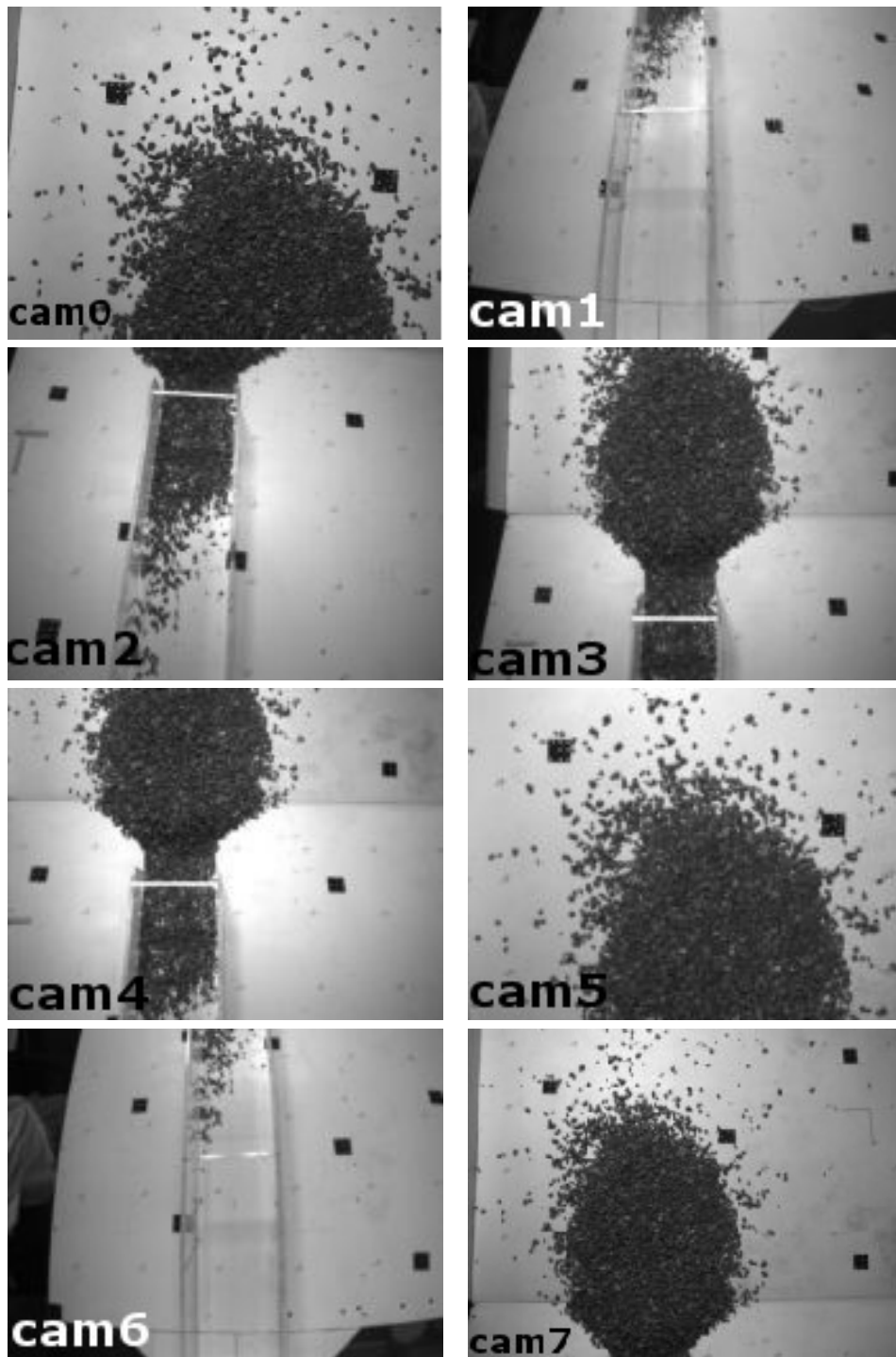


Figura 4.18: Fotogrammi ripresi dalle otto camere durante la prova dinamica al $t=2.5$ s.

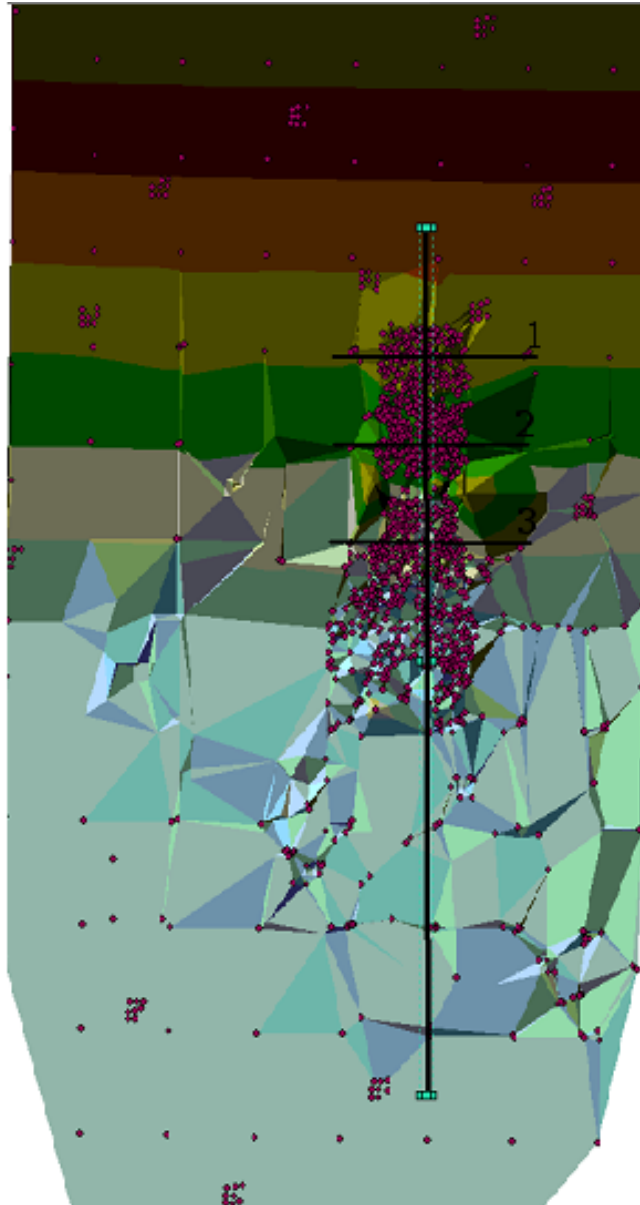


Figura 4.19: Risultato del TIN per la prova $t = 1,35$ s. I punti sperimentali sono riportati al di sopra in colore fucsia. Viengono mostrate le tracce dei profili

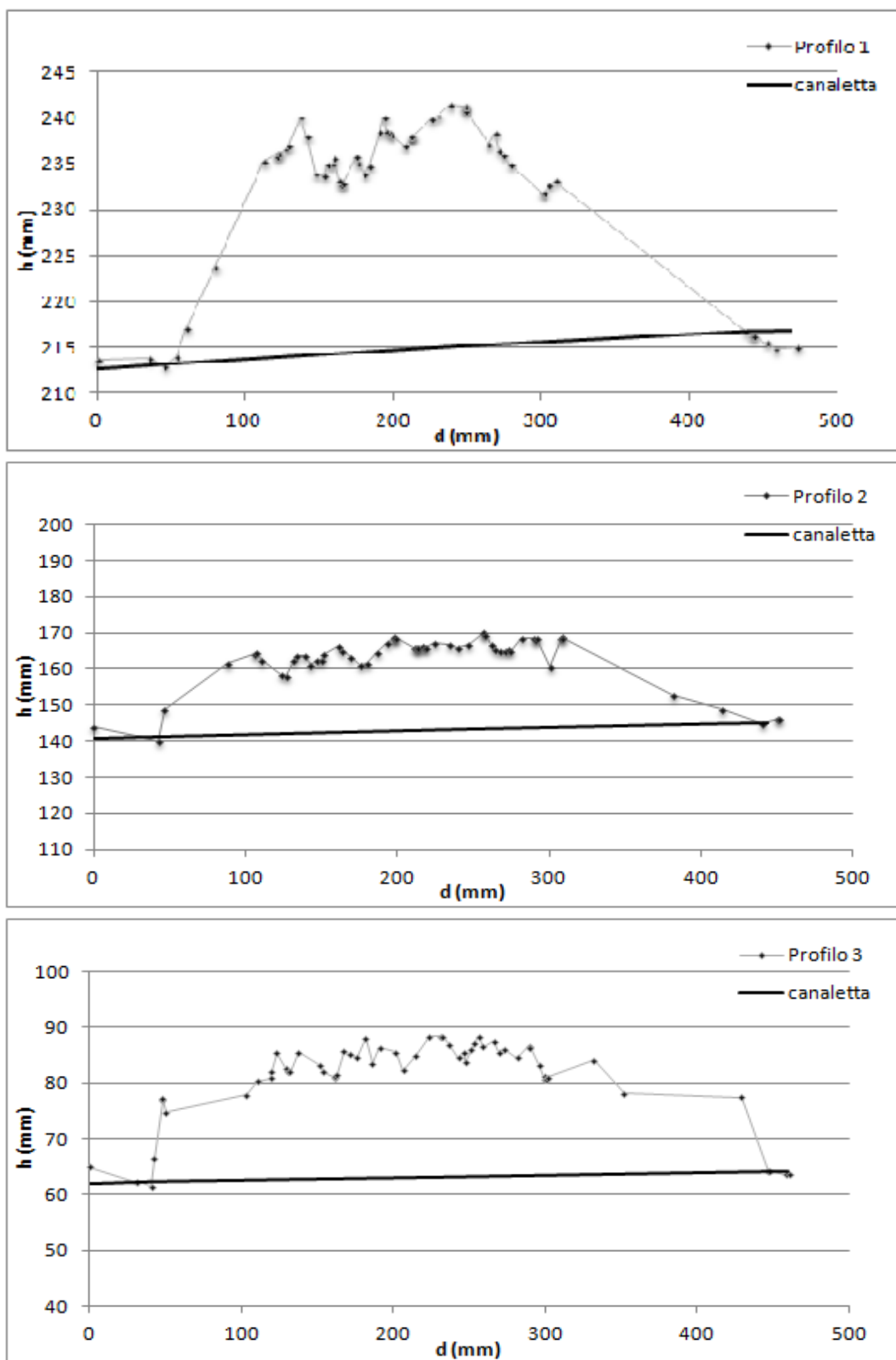


Figura 4.20: Profili trasversali n 1, 2, 3 condotti sul TIN prodotto dall'elaborazione dell'istante $t = 1,35s$.

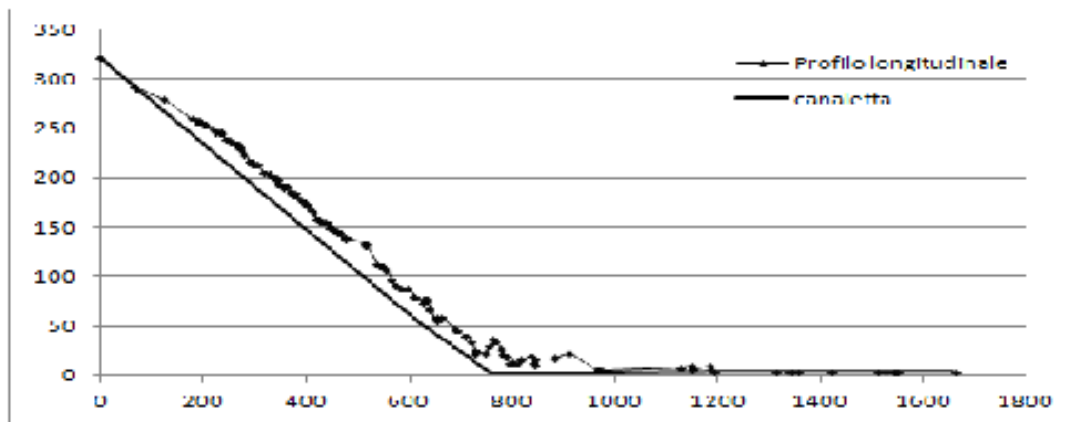


Figura 4.21: Profilo longitudinale condotto sul TIN della prova dinamica per $t = 1,35s$.

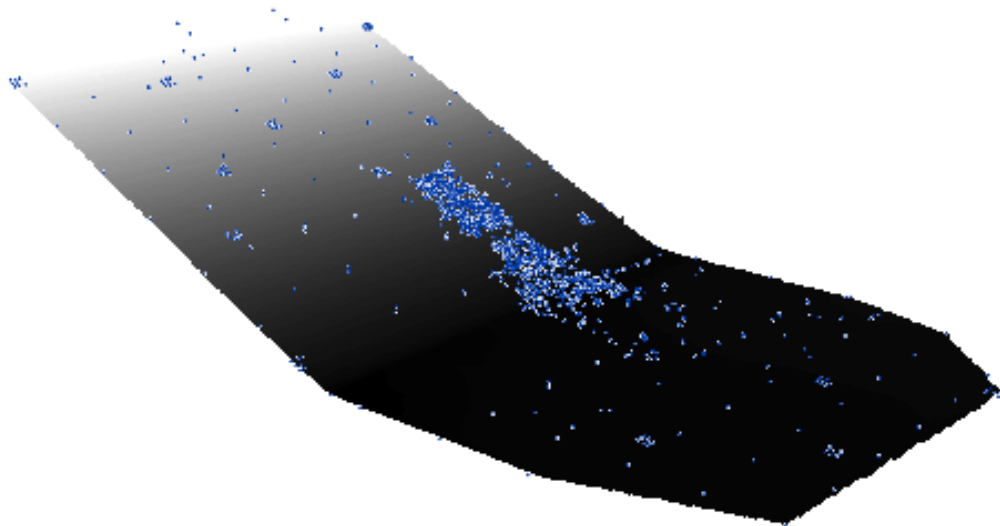


Figura 4.22: Ricostruzione tridimensionale sul piano della canaletta dell'ammasso granulare in movimento al $t = 1,35s$.

Analisi dell'ammasso granulare a $t = 1.8$ s

Si è proceduto alla creazione del TIN mostrato in Figura 4.23. Al di sopra di esso si sono condotti i cinque profili trasversali. Nei tre profili mostrati in Figura 4.24 si può apprezzare il fenomeno incanalato al $t = 1,8$ s dove il corpo ha iniziato a espandersi al di fuori della zona d'incanalamento ma non si è ancora riversato del tutto al di fuori. Questo istante scelto è un buon istante per la distribuzione del materiale lungo tutta la canaletta. Si è osservato che la parte terminale dell'ammasso granulare in movimento non viene descritta bene a causa dello scarso spessore del deposito stesso che crea una notevole difficoltà nel programma di costruire una nuvola di punti adeguata in quella zona. Nella zona ancora incanalata ma in prossimità dell'apertura sul piano è possibile caratterizzare bene il materiale come mostrano i tre profili. Lo spessore calcolato nelle tre sezioni, a differenza dell'istante analizzato sopra in cui nei tre profili si aveva una costanza nello spessore, aumenta progressivamente dal primo al terzo profilo. Nel primo profilo vale 15 mm, nel secondo profilo 30 mm e nel terzo profilo 50 mm. Questo descrive bene come il materiale scendendo mano a mano diminuisca il suo spessore a monte e lo aumenti a valle.

Sul piano invece dove il deposito si apre ed inizia ad accumularsi i profili sono stati tracciati necessariamente più lunghi e sono riportati in Figura 4.25. Essendo i profili condotti in una zona del deposito caratterizzata da una nuvola di punti molto densa, questi due profili sono carichi di informazioni e si possono apprezzare variazioni di 10 mm dovuti a qualche sasso sporgente al di sopra del deposito che non dona al profilo un andamento omogeneo. Nel Profilo 4 si può apprezzare come il deposito abbia un'altezza media al centro di circa 50 mm mentre già in corrispondenza del Profilo 5 quest'altezza diminuisce fino a 30 mm.

Si è eseguito un unico profilo longitudinale rappresentato in Figura 4.26 nel quale si vede come la parte di monte si è scaricata mentre nella parte di valle è iniziato l'accumulo del materiale.

Il modello tridimensionale di Figura 4.27 permette di apprezzare ancora di più la propagazione del fenomeno verso valle e l'inizio dell'accumulo.

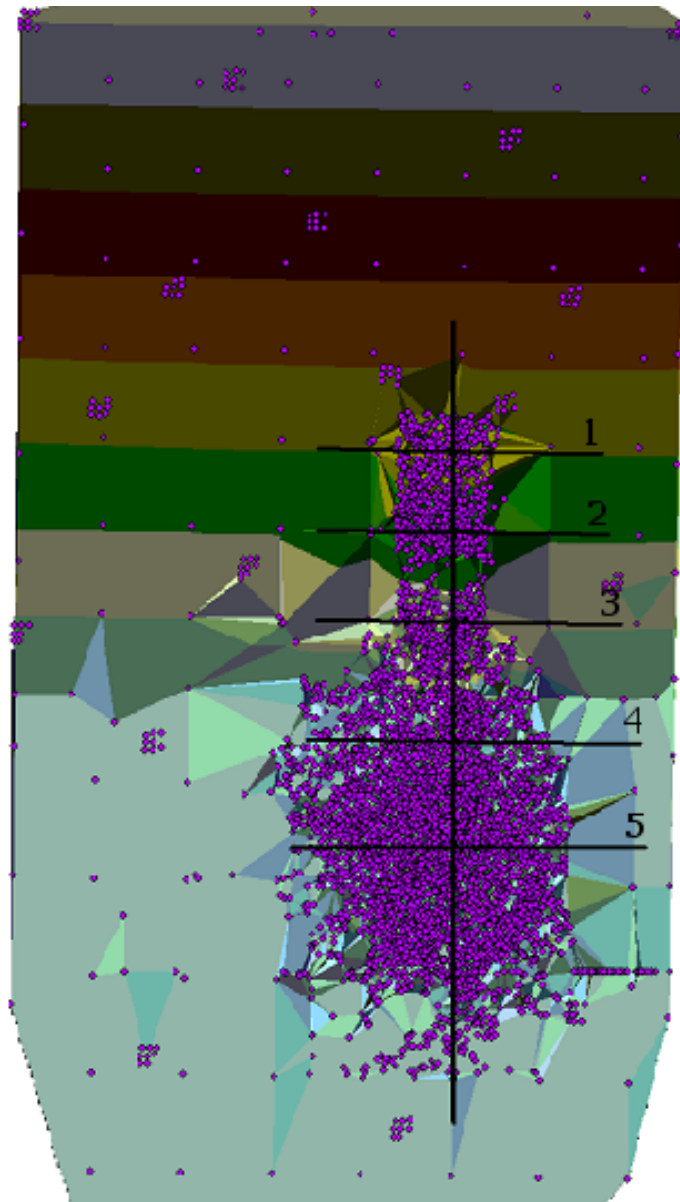


Figura 4.23: Risultato del TIN per la prova $t = 1,8$ s. I punti sperimentali sono riportati al di sopra in colore fucsia. Vengono mostrate le tracce dei profili.

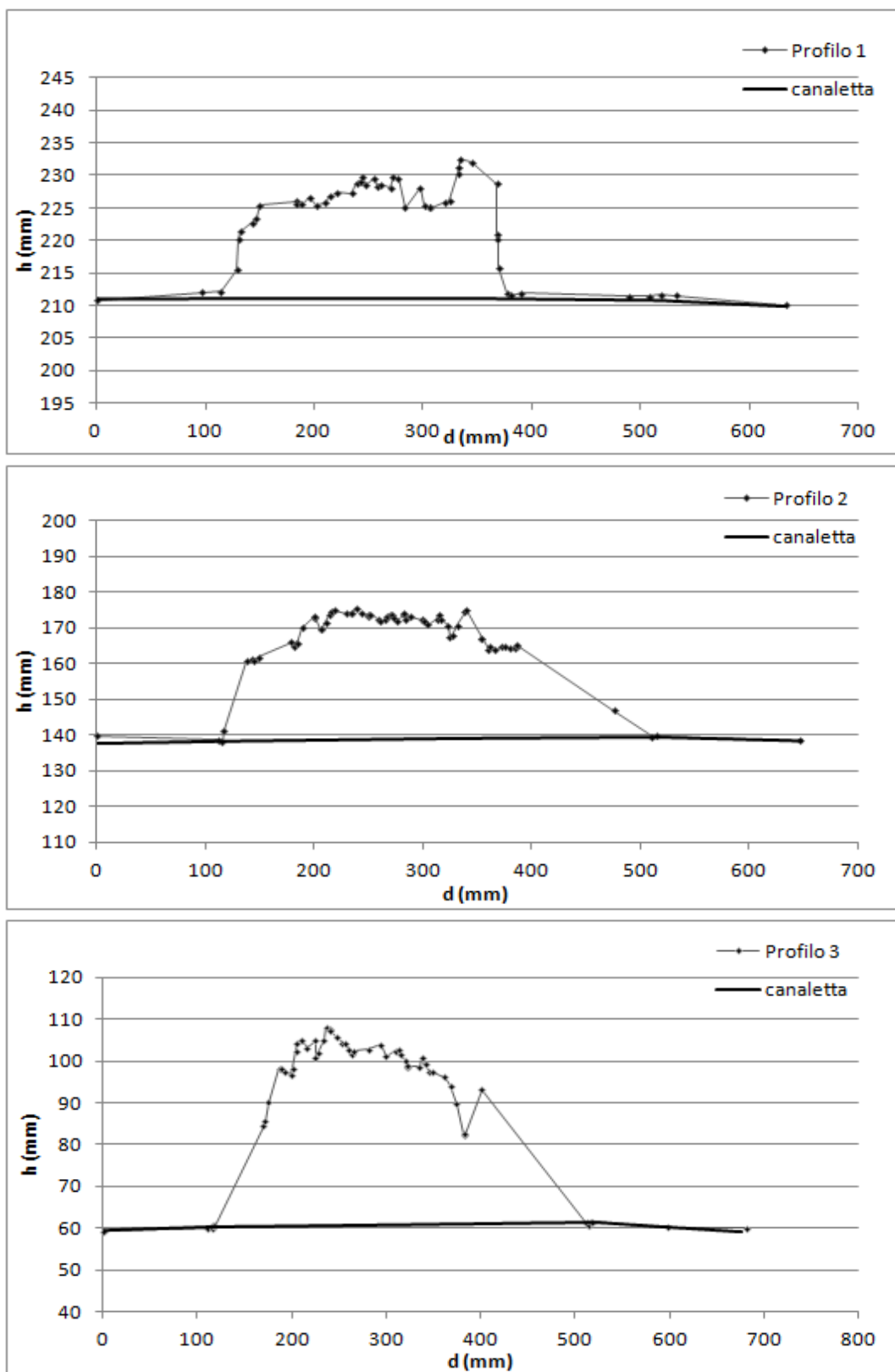


Figura 4.24: Profili trasversali n 1, 2, 3 condotti sul TIN prodotto dall'elaborazione dell'istante $t = 1,8s$.

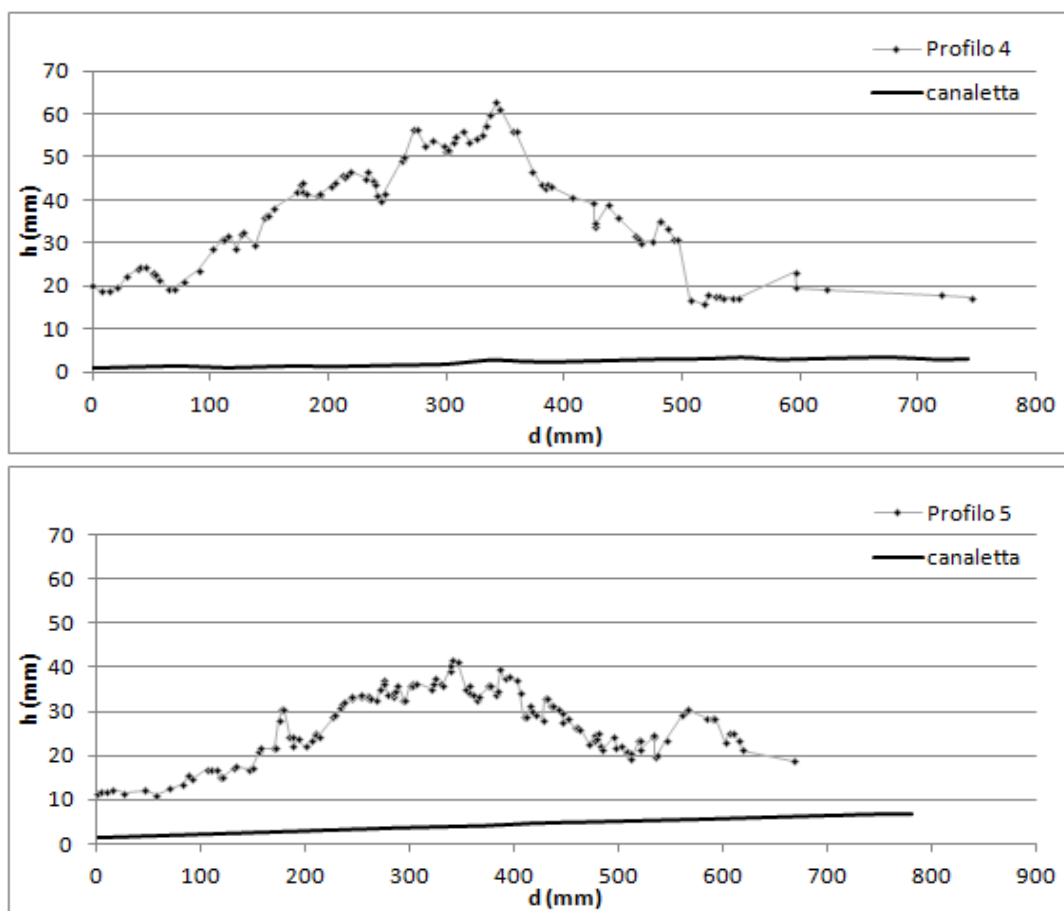


Figura 4.25: Profili trasversali n 4, 5 condotti sul TIN prodotto dall'elaborazione dell'istante $t = 1,8s$.

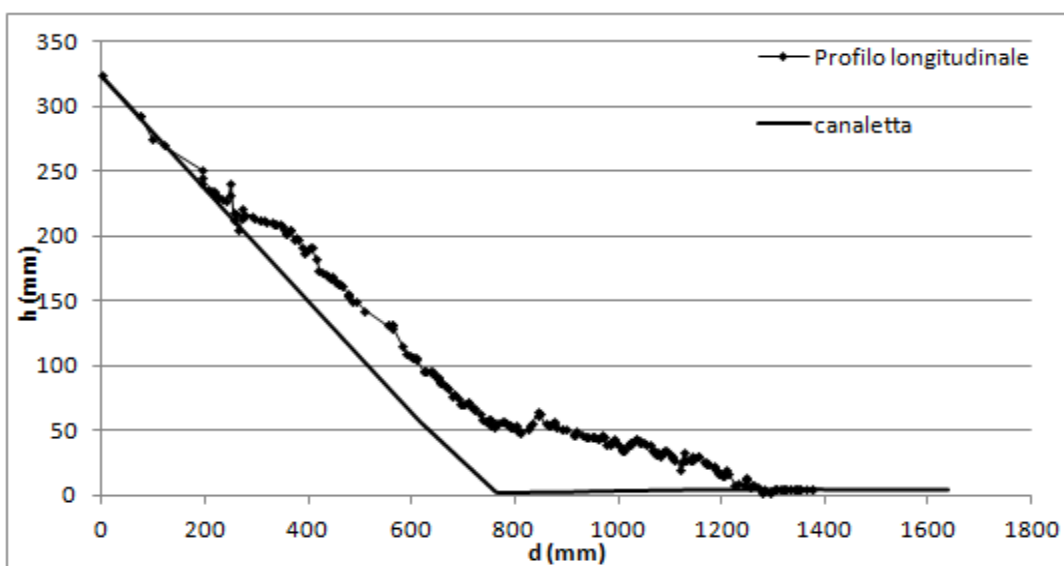


Figura 4.26: Profilo longitudinale condotto sul TIN della prova dinamica per $t = 1,8s$.

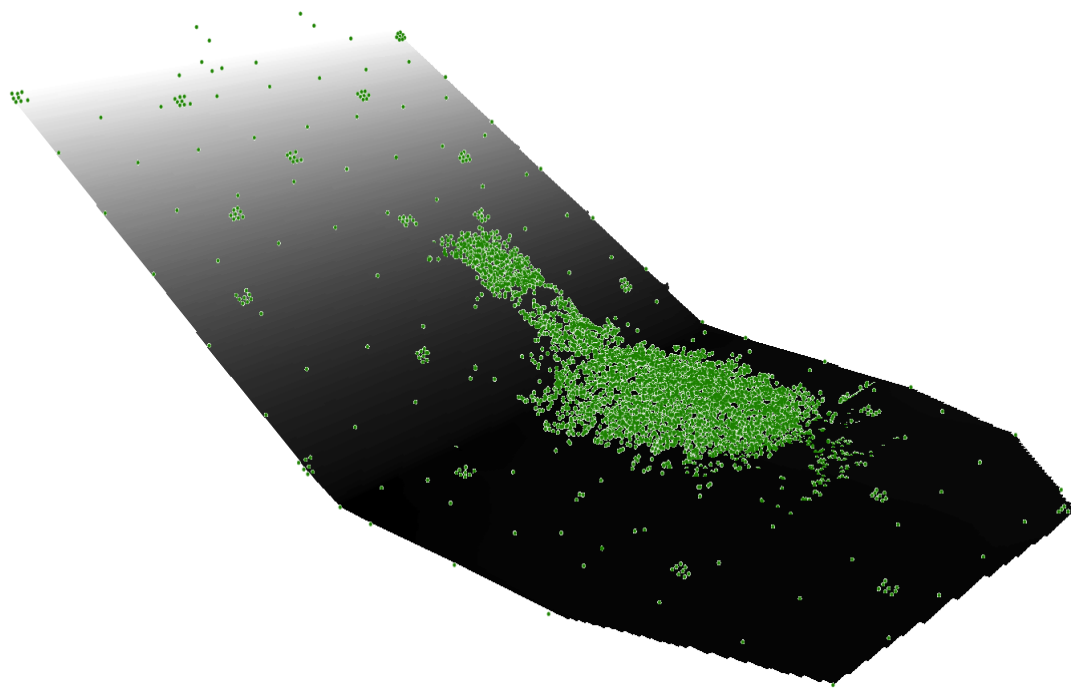
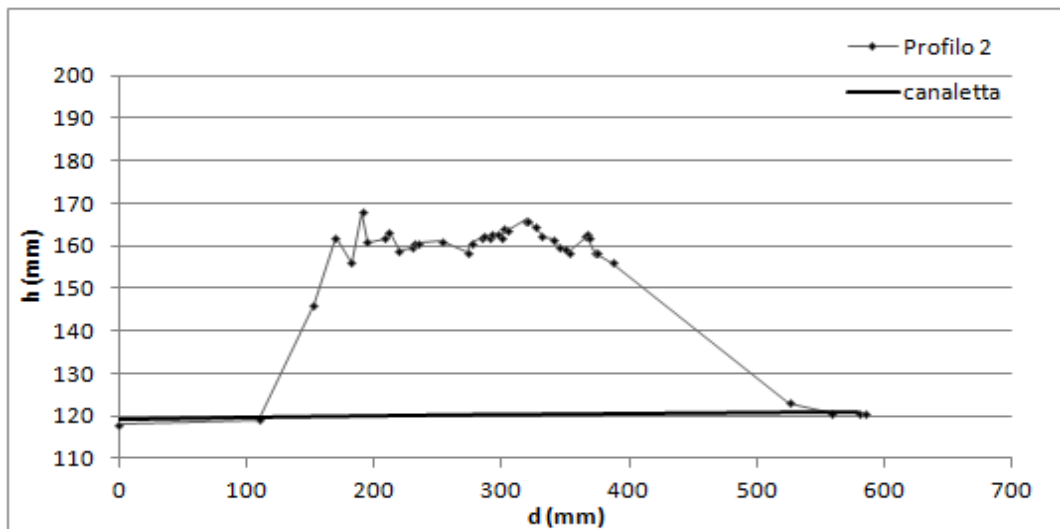


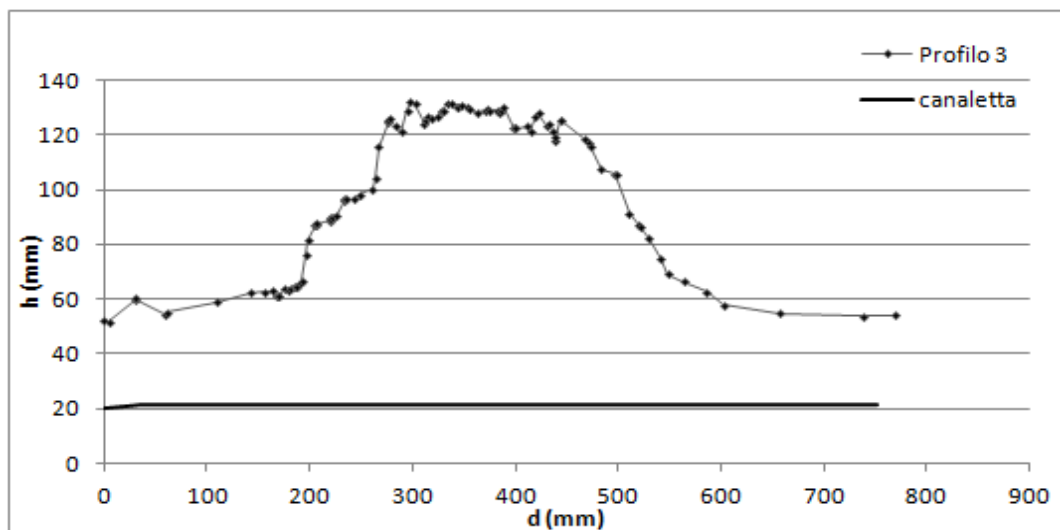
Figura 4.27: Ricostruzione tridimensionale sul piano della canaletta dell'ammasso granulare in movimento al $t = 1,8s$.

Analisi dell'ammasso granulare a $t = 2.5$ s

Si è proceduto alla creazione del TIN mostrato in Figura 4.28. Al di sopra di esso si sono condotti i cinque profili trasversali. Siccome il primo profilo risultava poco significativo poiché andava ad intercettare escusivamente la canaletta è stato scartato. Il Profilo 2 e Profilo 3 (Figura 4.2.4, Figura 4.2.4) rappresentano bene la parte del corpo granulare ancora incanalata al $t = 2,5$ s. Misurando gli spessori e confrontandoli con gli spessori dell'istante $t = 1,8$ s si vede come il Profilo 2 riduca il suo spessore da 30 mm a 20 mm; mentre nel Profilo 3 si passa da 50 mm a 100 mm. Si assiste quindi al progressivo aumento degli spessori verso la fine della zona incanalata. Il Profilo 4 e il Profilo 5 sono condotti nella zona di accumulo dell'ammasso e messi a confronto con i valori dell' $t = 1,8$ s mettono in evidenza nel Profilo 4 una aumento di spessore da 50 mm a 60 mm mentre per il Profilo 5 lo spessore rimane costante attorno ai 30 mm. Questo denota come all'istante $t = 2,5$ s il fenomeno è ancora concentrato alla fine della zona incanalata e il fenomeno dell'accumolo del materiale a valle è appena iniziato.



Profilo trasversale n 2 condotto sul TIN prodotto dall'elaborazione all'istante $t = 2,5$ s.



Profilo trasversale n 3 condotto sul TIN prodotto dall'elaborazione all'istante $t = 2,5$ s.

Si è eseguito un unico profilo trasversale rappresentato in Figura 4.30 nel quale si vede l'andamento del deposito.

Il modello tridimensionale di Figura 4.31 mostra l'evoluzione del fenomeno verso valle e l'evoluzione dell'accumulo.

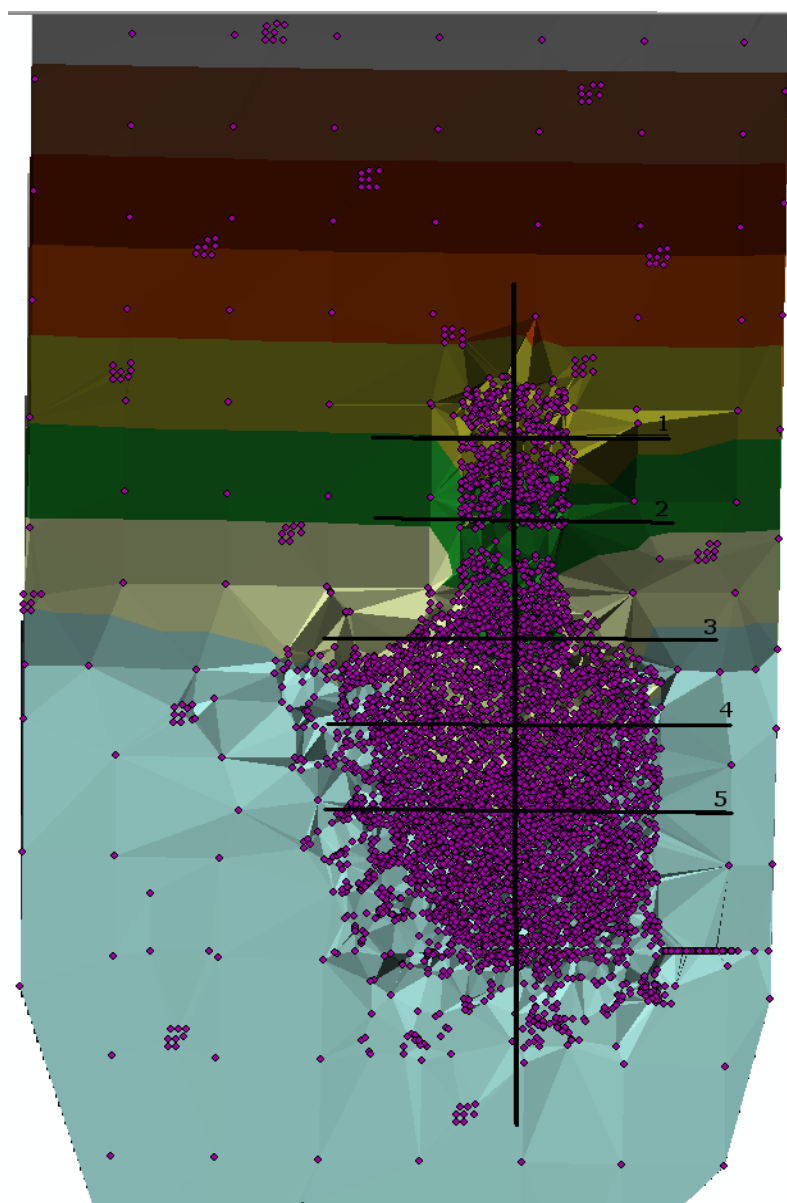


Figura 4.28: Risultato del TIN per la prova $t= 2,5s$. I punti sperimentali sono riportati al di sopra in colore fucsia. Viengono mostrate le tracce dei profili

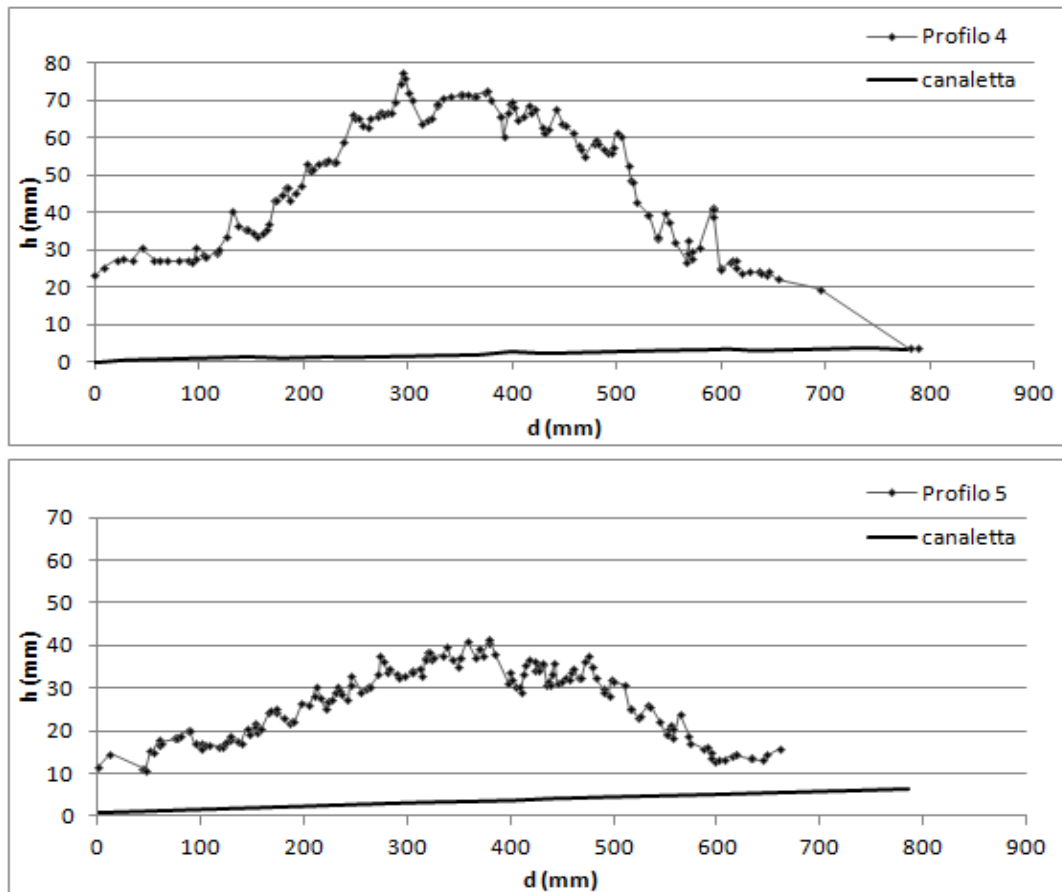


Figura 4.29: Profili trasversali n 4, 5 condotti sul TIN prodotto dall'elaborazione dell'istante $t = 2,5s$.

4.2.5 Analisi dei risultati e valutazioni conclusive

Nel confronto tra le sezioni longitudinali ai vari istanti, riportato in Figura 4.32, si può apprezzare il progressivo spostamento del materiale e inizio dell'accumulo verso valle. Osservando i tre profili si nota come nella zona di monte i profili dell'istante $t = 1,35s$ e $t = 1,8s$ risultino molto simili. La scatola di carico si sta ancora svuotando e lo spessore del materiale si mantiene all'incirca costante durante l'intervallo di tempo. Lo stesso non si può dire per il profilo di $t = 2,5s$ che risulta coincidente con il fondo della canaletta nel primo tratto e che in corrispondenza del Profilo 3 presenta un brusco aumento di spessore fino a 100mm evidenziando una concentrazione del fenomeno subito prima della fine della canaletta. Nella zona di valle invece si vede come all'istante $t = 1,35s$ non si ha presenza di deposito. Per gli istanti successivi $t = 1,8s$ e $t = 2,5s$ si osserva l'aumento di spessore del deposito dovuto all'inizio dell'accumulo del materiale che raggiunge il suo massimo proprio per $t = 2,5s$.

Quello che emerge dall'analisi di questi istanti è che attraverso questa analisi fotogrammetrica è possibile caratterizzare bene il deposito. Avendo eseguito gli stessi profili per tutte le prove questi, messi a confronto, hanno evidenziato delle apprezzabili variazioni tra un istante e quello successivo. In tutti i TIN è presente però una zona tra il Profilo 2 e il Profilo 3 in cui la nuvola di punti non è presente. Questo fenomeno è dovuto al distanziatore trasversale che congiunge le due sponde opposte della canaletta, che non viene riconosciuto dal software fotogrammetrico. Una soluzione a questo problema è la sostituzione del distanziatore interno con degli appoggi esterni alle pareti della canaletta. Si è osservato, inoltre, che la nuvola di punti viene calcolata esclusivamente sopra il deposito e non sulla canaletta. La precisione di calcolo dei pochi punti considerati al di fuori del deposito non è buona e il raccordo tra i punti sul deposito e i punti sulla canaletta risulta poco preciso. Conseguentemente, prima dell'elaborazione dei vari TIN si è reso necessario eliminare tali dati.

Il risultato delle elaborazioni nel complesso si può ritenere buono anche se con opportuni accorgimenti si ritiene di poter aumentare significativamente le prestazioni di questo processo fotogrammetrico. Vin-

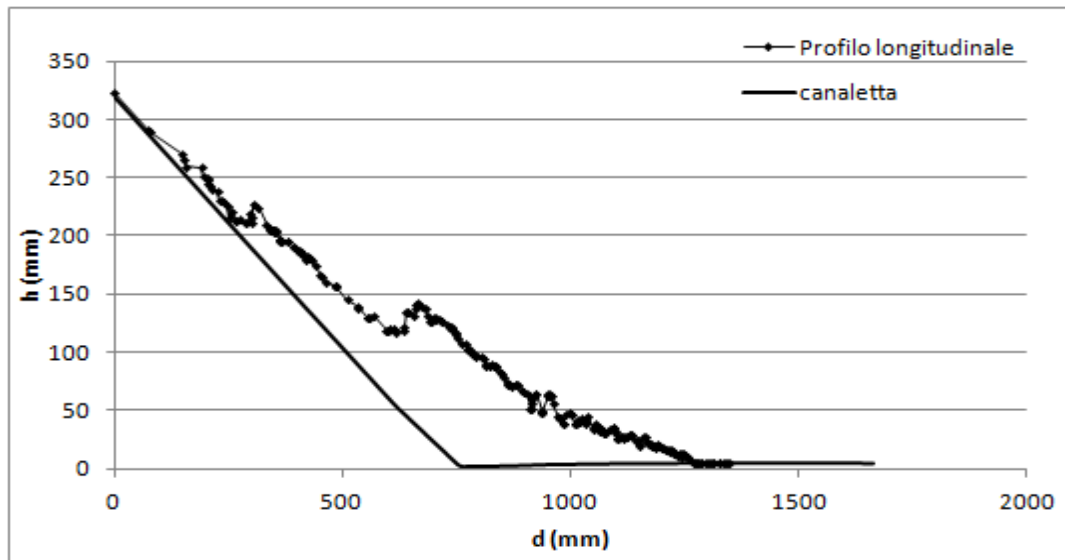


Figura 4.30: Profilo longitudinale condotto sul TIN della prova dinamica per $t = 2,5$ s.

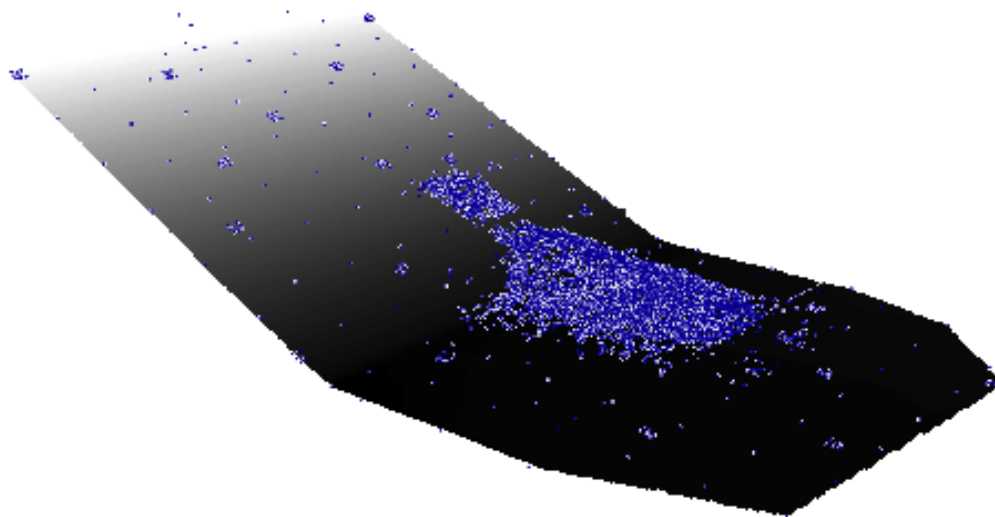


Figura 4.31: Ricostruzione tridimensionale sul piano della canaletta dell'ammasso granulare in movimento a $t = 2,5$ s.

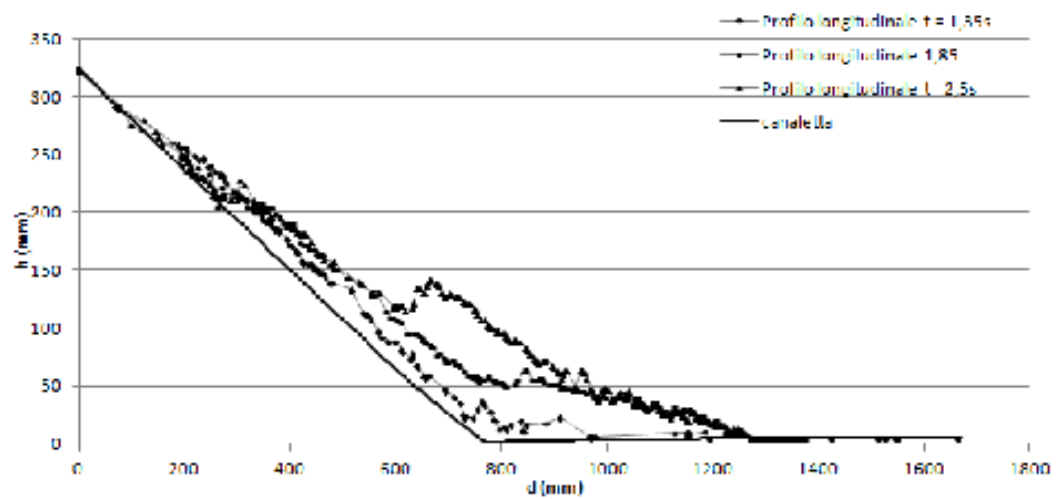


Figura 4.32: Confronto tra i profili longitudinali condotti nelle tre prove con il piano della canaletta riportato al di sotto.

colati all'uso di 8 camere e quindi la possibilità di elaborare 8 fotogrammi per ogni istante una soluzione potrebbe essere quella di inserire un numero maggiore di marker (GCP) sia sulla canaletta che tutto attorno al deposito.

Un altro aspetto che deve essere approfondito è la verifica della qualità del rilievo dinamico mediante l'accoppiamento con tecniche di misura standard, per esempio con l'utilizzo e l'acquisizione contemporanea da distanziometri laser.

Capitolo 5

Conclusioni

- Il lavoro di tesi è stato dedicato alla analisi fotogrammetrica dinamica del moto di ammassi granulari secchi in laboratorio. È stata montata l'installazione sperimentale presso il Dipartimento di Geoscienze dell'Università di Padova e sono state eseguite varie prove al fine di testare software e hardware;
- Sono stati valutati sperimentalmente i parametri fondamentali del materiale granulare utilizzato al fine di una successiva utilizzazione numerica, mediante l'uso di una scatola di taglio realizzata allo scopo;
- Sono stati esaminati diversi software fotogrammetrici (Leica Suite Photogrammetry, AgiSoft PhotoScan, Australis) e sono state messe in evidenza le loro proprietà e i campi dove possono essere più proficuamente impiegati agli scopi di questo lavoro;
- L'esperienza acquisita permette di affermare che, per il raggiungimento di risultati soddisfacenti rispetto alle attese, è necessaria un'approfondita conoscenza teorica dei vari aspetti delle tecniche fotogrammetriche, una adeguata conoscenza della struttura del sistema fisico da analizzare e una approfondita conoscenza dei diversi software disponibili sul mercato;
- Il software Australis è stato utilizzato ai fini della calibrazione delle ottiche, determinando i parametri di orientamento interno ed esterno con adeguata precisione. I parametri ottenuti sono stati indispensabili per l'utilizzo dei programmi di elaborazione Leica Suite Photogrammetry e AgiSoft PhotoScan;
- Per le applicazioni prese in considerazione in questo lavoro, AgiSoft PhotoScan ha mostrato un maggior grado di indipendenza dall'operatore rispetto a Leica Suite Photogrammetry;
- Nelle prove statiche eseguite, il confronto tra le misure effettuate in modo diretto sul deposito (misure di profondità massima, lunghezza massima, larghezza massima e pendenza) hanno mostrato un buon accordo con le misurazioni ottenute a conseguenza della generazione del dtm per via fotogrammetrica;
- Confronti analoghi in condizioni dinamiche non sono stati eseguiti in questo lavoro e saranno oggetto di successivi approfondimenti;
- I risultati ottenuti dalle prove dinamiche mostrano buona coerenza con i risultati ottenuti staticamente. La qualità delle immagini e l'istantaneità dei fotogrammi (i due problemi fondamentali da risolvere per poter affrontare con successo il processo fotogrammetrico) si sono mostrati adatti allo scopo. I risultati ottenuti devono ritenersi buoni. La loro qualità può, comunque, essere notevolmente migliorata adottando alcuni accorgimenti emersi dalle applicazioni eseguite.

Bibliografia

- [1] Manual of Photogrammetry, 4th Ed., ASPRS, 1980
- [2] F. Migliaccio (2003). Principi di Fotogrammetria.
- [3] R. Galetto (2002). La fotogrammetria aerea.
- [4] Balletti - Guerra - Fregonese – Monti (2006). Appunti di fotogrammetria.
- [5] Balletti (2007). Il rilievo fotogrammetrico.
- [6] C. Cali (2007-rev_10/11). Ottica geometrica ed applicazioni.
- [7] L. Barazzetti, L. Mussio, F. Remondino, M. Scaioni. Targetless camera calibration. Technical report, Politecnico di Milano, Dept. of Building Engineering Science and Technology, Milan, Italy; 3D Optical Metrology Unit, Bruno Kessler Foundation (FBK), Trento, Italy.
- [8] Australis – www.photometrix.com.au
- [9] Leica Geosystems. Leica Photogrammetry Suite Project Manager. Leica Geosystems Geospatial Imaging, LLC, Norcross, GA 30092-2500 USA, 9 dicembre 2005.
- [10] P. R. Wolf. Elements of Photogrammetry. New York, McGraw-Hill, Inc., 1983.
- [11] F. Remondino, C. Fraser (2006). Digital camera calibration methods: considerations and comparisons. Technical report, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Switzerland, Department of Geomatics, University of Melbourne, Australia.
- [12] James Bethel Abdullatif Alharthy. Laboratory self calibration of a multi band sensor. Technical report, School of Civil Engineering, Purdue University, 1284 Civil Engineering Building, West Lafayette, IN 47907.
- [13] Basler. User's manual for GigE cameras Basler AG. An der Strusbek 60 - 62 22926 Ahrensburg Germany. www.baslerweb.com
- [14] S. De Toni, P. Scotton (2004). Modellomatematico e numerico bidimensionale per lo studio delle valanghe di neve densa. Quaderni del Dipartimento IDR2, Università degli Studi di Trento, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale.
- [15] De Toni S., Scotton P., (2005). Two-dimensional mathematical and numerical model for the dynamics of granular avalanches. COLD REGIONS SCIENCE AND TECHNOLOGY, vol. 43; p. 36-48, ISSN: 0165-232X.
- [16] Armanini A., Fraccarollo L., Rosatti G. (2008). Two-dimensional simulation of debris flow in erodible channels. Computers & Geosciences, doi: 10.1016/j.cageo.2007.11.008. (-)
- [17] Scotton P., De Toni S., Moro F. (2008). Passive defense structures against dense snow avalanches - experimental analysis. In: Protection of populated territories from floods, debris flow, mass movement and avalanches. Dornbirn, Australia, 26-30 May 2008, KLAGENFURT: International Research Society Interpraevent, vol. 2, p. 593- 604, ISBN/ISSN: 978-3-901164-10-1
- [18] Armanini A., Trivellato F., (1990). La modellazione fisica dei debris flow, XXII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Cosenza, 4-7 ottobre, Editoriale Bios.

- [19] Iverson, R.M., Costa J. E., LaHusen R.G., (1992). Debris- flow flume at H. J. Andrews Experimental Forest, Oregon, U.S.G.S. Open-file Report 92-483, 2p.
- [20] Kronecny G., Lehmann G. (1984). Photogrammetrie. Walterde Gruyter Verlag, Berlin.
- [21] Scotton P., Vettorazzi M., Chiocchetti F. (2006). Monitoraggio di tratti di corsi d'acqua a forte pendenza con tecniche fotogrammetriche da terra. In: 10 Conferenza Nazionale ASITA. Fiera di Bolzano, Bolzano, 14-17 novembre.
- [22] Petley D. N., Mantovani F., Bullmer M.H., Zannoni A. (2005). The use of surface monitoring data for the interpretation od landslide movement patterns. *Geomorphology*, 66, 1-4, pp. 133-147.
- [23] Armanini A., Trivellato F. (1990). La modellazione fisica dei debris flow, XII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Cosenza, 4-7 ottobre, Editoriale Bios.
- [24] Scotton P., Chiocchetti F., 2006. Field surveying of reaches of high slope streams performed by earth photogrammetric technique. *Idronomia Montana* 25, Nuova Editoriale Bios.
- [25] Agisoft. Agisoft Photo Scan User Manual Professional Edition. www.agisoft.ru
- [26] ESRI. ArcGIS User Manual. www.esri.com