

Università degli Studi di Padova

SCUOLA DI SCIENZE

Dipartimento di Geoscienze

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN GEOLOGIA

E GEOLOGIA TECNICA

**ANALISI DI LABORATORIO E DI CAMPO DI
ALCUNI ASPETTI DELLA DINAMICA DEGLI
AMMASSI GRANULARI**

Relatore: Prof. Ing. Paolo Scotton

Correlatore: Dott. Damiano Vescovo

Laureando: Luca Tardivo

ANNO ACCADEMICO 2014-2015

Abstract

Some aspects of debris flow dynamics in the lab and on the field have been analyzed in this thesis.

Different tests have been performed employing an experimental flume made of a plain pair set to a different slope. Tests have been carried out on a open slope and on a channelized slope, employing different granular materials that differ from one another for their grain size distribution, their density, their shape factor and rheologic properties.

The main material physical parameters have been experimentally determined.

The experimental equipment is provided with a set of eight cameras controlled by a software and hardware system in order to capture 15 fps simultaneously and its main purpose is the tridimensional photogrammetric reproduction of the granular mass evolution during its movement.

Experimental data processing have been made, mostly, from photogrammetric survey.

Field investigation have been carried out in the debris flow site of Acquabona, near Cortina d'Ampezzo (BL), during the 2015 spring and summer periods. The upstream and downstream monitoring stations of the existing monitoring system have been partially activated. A midstream station that has to be installed in the next monitoring season has also been designed.

Combined analysis of the observations made with the camera installed in the downstream station and of rain data from raingauges installed inside the rio Acquabona basin have been performed. Besides some field observations about creek bedforms, active bank landslides feeding the channel with debris and comparison between online meteorological services forecasting capability and field data have been made.

Sommario

In questo lavoro di tesi vengono analizzati alcuni aspetti della dinamica degli ammassi granulari in laboratorio e sul campo.

In laboratorio sono stati realizzati diversi test utilizzando una canaletta costituita da due piani a pendenza diversa. I test sono stati realizzati su pendio aperto e su pendio incanalato, utilizzando diversi materiali granulari, diversi per la loro distribuzione granulometrica, per densità, per fattore di forma e proprietà reologiche.

I parametri fisici principali dei materiali granulari utilizzati sono stati determinati sperimentalmente.

L'apparato sperimentale è fornito di un sistema di otto videocamere ad acquisizione contemporanea ed è finalizzato alla riproduzione tridimensionale fotogrammetrica della evoluzione della superficie dell'ammasso in movimento.

Le elaborazioni dei dati sperimentali sono state eseguite, in gran parte, a partire dal rilievo fotogrammetrico eseguito.

L'attività di campo si è svolta presso il sito da colate di detriti del rio di Acquabona, presso Cortina d'Ampezzo (BL), durante la stagione primavera-estate del 2015. Sono state parzialmente attivate le stazioni di valle e di monte del sistema di monitoraggio esistente ed è stata progettata una stazione intermedia che verrà installata nella prossima stagione di osservazione.

Accanto all'analisi dei dati ottenuti dalle osservazioni con videocamera installata presso la stazione di valle e dai pluviometri distribuiti all'interno del bacino del rio di Acquabona, sono state eseguite alcune osservazioni di campo sulle forme di fondo presenti in alveo, sulle frane di sponda attive che alimentano di detriti il canale da colata e sulla capacità previsionale dei servizi meteorologici disponibili in rete, mediante il confronto con i dati effettivamente misurati sul posto.

Indice

1	Introduzione	1
2	Inquadramento Geografico	3
3	Inquadramento Geologico	5
4	Attività di campo: il canale da colata di detriti del rio Acquabona	9
4.1	Scopo	9
4.2	Il sistema di monitoraggio del rio Acquabona	10
4.3	Attività ed osservazioni di campo	12
4.3.1	Osservazioni morfologiche sul rio Acquabona	26
4.4	I problemi riscontrati durante il monitoraggio	30
4.5	La colata di detrito dell'8 agosto 2015	31
4.5.1	Introduzione	31
4.5.2	Analisi sui dati pluviometrici	32
4.5.3	Analisi tramite la telecamera	32
4.6	Analisi sui tempi di ritardo tra evento piovoso e ruscellamento a valle .	37
4.7	Conclusioni	40
5	Attività sperimentale	43
5.1	Introduzione	43
5.2	L'apparato sperimentale	43
5.2.1	La canaletta	43
5.2.2	Le videocamere per l'analisi fotogrammetrica	45
5.2.3	Il sistema di acquisizione	45
5.2.4	I materiali utilizzati	46
5.2.5	I target codificati	48
5.3	Caratterizzazione dei materiali	48

5.3.1	Prove di densità	48
5.3.2	Prove di compattazione	49
5.3.3	Prove d'attrito sul fondo tra materiale e superficie della canaletta	49
5.4	Elementi di fotogrammetria	50
5.4.1	Orientamento esterno	57
5.4.2	Le equazioni di collinearità	58
5.5	Calibrazione delle videocamere	59
5.6	Le prove di laboratorio - generalità	61
5.7	Prove su pendio aperto	61
5.7.1	Effetto della distribuzione granulometrica	62
5.8	Prove su pendio incanalato	64
5.9	Prove su pendio incanalato con deviatore di flusso	67
5.10	Creazione del DTM della canaletta per le prove su pendio aperto	67
5.10.1	Creazione del DTM mediante la macchina fotografica Canon	67
5.10.2	Creazione del DTM mediante le videocamere	70
5.10.3	Confronto tra i DTM della canaletta	70
5.11	Creazione del DTM del materiale per le prove su pendio aperto	72
5.12	Creazione del DTM della canaletta per le prove su pendio incanalato . .	72
5.12.1	Pendio incanalato senza deviatore	72
5.12.2	Pendio incanalato con deviatore	74
5.13	Creazione del DTM del materiale per le prove su pendio incanalato . . .	75
5.14	Creazione del DTM composto	75
5.15	Evoluzione del volume del materiale nel tempo	75
5.15.1	Risultati per le prove su pendio aperto	79
5.15.2	Risultati per le prove su pendio incanalato	79
5.16	Osservazioni sulle prove eseguite	82
5.16.1	Osservazioni sulle prove su pendio aperto	82
5.16.2	Osservazioni sulle prove su pendio incanalato senza deviatore	88
5.16.3	Osservazioni sulle prove su pendio incanalato con deviatore di flusso	88
6	Altre ossevizioni di campo	91
6.1	Analisi delle forme di fondo osservate nell'alveo del rio Acquabona . . .	91
6.2	Analisi fotogrammetrica di una frana	93
6.3	Precipitazioni misurate e previsiononi	93

INDICE

iii

7 Conclusioni

99

Elenco delle figure

2.1	Collocazione geografica del canalone di Acquabona. Attraverso i segnaposto sono evidenziate le posizioni della vasca di accumulo e del bacino di alimentazione. (da Google Earth).	4
3.1	Affioramento della Formazione di Travenanzes o Raibl all'interno del canale di Acquabona.	6
3.2	Dettaglio dell'area di Acquabona presente nella Carta Geologica d'Italia 1:50.000, Foglio 29, Cortina d'Ampezzo (sito ISPRA, 2015).	7
4.1	Assetto della stazione di valle il giorno 19/06/2015.	13
4.2	Strumentazione della stazione di valle. A sinistra sono visibili il computer, il router, i due alimentatori, l'hard disk e il termometro di massima e minima. A destra è visibile il gruppo di continuità collegato alla corrente.	13
4.3	Strumentazione esterna della stazione di valle. Sono visibili un pluviometro a basculante, una telecamera ed un laser.	14
4.4	Danni riportati dalla stazione di monte.	14
4.5	Probabile posizione della stazione intermedia, in cima al masso più a sinistra sullo sfondo.	15
4.6	Depositi di colata rilevati il 22 ottobre 2014.	16
4.7	Armadietto facente parte della stazione di valle del sistema di monitoraggio di fine secolo scorso e di cui è previsto il riutilizzo nell'ambito della realizzazione della nuova stazione intermedia.	17
4.8	Valanga di neve granulare filmata durante l'escursione del 18 marzo 2015.	18
4.9	Il rio Acquabona nella zona della stazione di valle il 19 giugno 2015 (vista da valle verso monte).	19
4.10	Nuovi depositi di colata adiacenti al canalone di Acquabona. La deposizione è avvenuta nelle settimane precedenti al 19 giugno 2015.	20

4.11 Colata di detriti del 23 giugno 2015 in località Acquabona, poco a valle del rio Acquabona.	20
4.12 Colata di detriti dell'8 luglio 2015 in località Acquabona, poco a valle del rio Acquabona.	21
4.13 Posizione dei pluviometri lungo il canale.	22
4.14 Assetto dei tre pluviometri. In alto a sinistra è visibile il pluviometro di valle, a destra quello di mezzo ed in basso a sinistra quello di monte. . .	23
4.15 La situazione del canale di Acquabona in prossimità della stazione di valle il 16 luglio 2015.	24
4.16 Lo sbarramento (a sinistra) che crea accumulo di sedimento più a monte (a destra).	24
4.17 Un control point predisposto per l'analisi fotogrammetrica del canale di colata.	25
4.18 Lo sbarramento con accumulo di materiale a monte nella zona a valle della formazione di Raibl.	25
4.19 Colata di San Vito di Cadore del 5 agosto 2015.	26
4.20 Foto della nube di polvere creata da una frana di crollo sulle pareti rocciose del Sorapiss il 29 agosto 2015.	27
4.21 La protezione civile al lavoro sui depositi lasciati dalla colata di detrito del 14 settembre 2015.	27
4.22 Il canale di colata in prossimità della stazione di valle, il 22 agosto 2015. A sinistra: il deposito si interrompe nella zona della stazione di valle; a destra: la quota del deposito è prossima alla quota delle sponde.	28
4.23 Accumulo a monte di uno sbarramento naturale formatosi a valle della formazione di Travenanzes.	29
4.24 A sinistra, una vista da valle dello sbarramento naturale che causa l'accumulo rilevata il 28 luglio 2015; a destra, una vista aerea dell'accumulo ottenuta il 29 luglio 2015.	29
4.25 Visuale della telecamera montata presso la stazione di valle a fine luglio 2015. In alto la sponda destra; in basso, la sponda sinistra.	31
4.26 Andamento della intensità di precipitazione oraria nel tempo, presso il pluviometro di monte, durante l'evento di pioggia dell'8 agosto 2015. La valutazione è fatta per i periodi di tempo di 2 min., 5 min. e 10 min. .	33
4.27 Andamento della intensità di precipitazione oraria nel tempo, presso il pluviometro di valle, durante l'evento di pioggia dell'8 agosto 2015. La valutazione è fatta per i periodi di tempo di 2 min., 5 min. e 10 min. .	34

4.28	Visibilità della telecamera durante la notte.	35
4.29	Grafico riassuntivo, comprensivo di intensità di precipitazione e cumulate per il pluviometro di monte (sotto) e di valle (in mezzo). Sopra sono anche stati inseriti gli impulsi di colata caratterizzati qualitativamente secondo la loro entità e momento di inizio e fine del flusso idrico.	38
4.30	Precipitazione cumulata nel periodo considerato di attività dei pluviometri e istante di attivazione della telecamera.	39
4.31	Precipitazione cumulata dell'evento del 4 agosto 2015.	39
5.1	La canaletta, costituita da due piani inclinati, utilizzata per le prove.	44
5.2	I clisimetri per la determinazione della pendenza del piano di monte e di valle collocati in destra orografica della canaletta sperimentale.	44
5.3	I clisimetri per la determinazione della pendenza del piano di monte e di valle collocati in sinistra orografica della canaletta sperimentale.	44
5.4	Assetto delle videocamere e degli illuminatori.	45
5.5	Trigger esterno che, assieme al software Labview, garantisce la contemporaneità degli scatti delle videocamere.	46
5.6	I materiali utilizzati per le prove. In alto a sinistra la ghiaia grossa, in alto a destra la ghiaia fine, in basso a sinistra le zeoliti, in basso a destra un dettaglio delle zeoliti.	47
5.7	Target codificati e target a punto singolo retro-riflettenti utilizzati per la restituzione fotogrammetrica. Il diametro del punto bianco è 6 mm.	48
5.8	A sinistra, la ghiaia fine disposta nel cilindro in condizioni definite di massima porosità; a destra, la stessa massa in condizioni di massimo compattamento a seguito di vibrazione manuale applicata al cilindro.	49
5.9	Visione d'insieme della scatola di taglio e del sistema di trasmissione della forza orizzontale applicata.	50
5.10	Grafico che riporta i risultati delle prove di attrito sul fondo per la ghiaia grossa con relativo errore associato ad ogni punto ed al valore dell'angolo d'attrito.	51
5.11	Grafico che riporta i risultati delle prove di attrito sul fondo per la ghiaia fine con relativo errore associato ad ogni punto ed al valore dell'angolo d'attrito.	51
5.12	Grafico che riporta i risultati delle prove di attrito sul fondo per le zeoliti con relativo errore associato ad ogni punto ed al valore dell'angolo d'attrito.	52
5.13	Esempio di CCD a 10,2 Megapixel.	53

5.14	Caratteristiche geometriche delle lenti.	53
5.15	Rifrazione del raggio luminoso.	55
5.16	Schema di formazione dell'immagine per una lente rappresentata dai suoi punti nodali.	55
5.17	Deviazione del centro dell'asse ottico dalla congiungente delle marche fiduciali, sul piano dell'immagine.	56
5.18	Distorsione radiale e tangenziale delle lenti.	57
5.19	Definizione dei parametri di orientazione esterna.	58
5.20	Il contenitore metallico di forma tronco-conica utilizzato nelle prove su pendio aperto e la posizione di rilascio sul piano di monte della canaletta.	62
5.21	Deposito finale dell'ammasso granulare costituito da ghiaia grossa per la prima prova eseguita su pendio aperto, sulla sinistra, e per la sua ripetuta, sulla destra.	63
5.22	Deposito finale dell'ammasso granulare costituito da ghiaia fine per la prima prova eseguita su pendio aperto, sulla sinistra, e per la sua ripetuta, sulla destra.	63
5.23	Deposito finale dell'ammasso granulare costituito da zeolite sintetica per la prima prova eseguita su pendio aperto, sulla sinistra, e per la sua ripetuta, sulla destra.	63
5.24	Prova con ghiaia grossa con una frazione in peso trascurabile di materiale zeolitico (dell'ordine dello 0,1notevolmente rispetto al caso di assenza della zeolite (Figura 5.21).	64
5.25	Il doppio piano inclinato con le sponde sul piano di monte.	65
5.26	La vasca di carico nel caso delle prove su pendio incanalato e la disposizione assegnata al materiale granulare. Nell'immagine sono ben visibili i target fotogrammetrici sulle sponde laterali della canaletta applicati ai fini della restituzione fotogrammetrica.	65
5.27	Deposito finale dell'ammasso granulare costituito da ghiaia grossa per la prima prova eseguita su pendio incanalato, sulla sinistra, e per la sua ripetuta, sulla destra.	66
5.28	Deposito finale dell'ammasso granulare costituito da ghiaia fine per la prima prova eseguita su pendio incanalato, sulla sinistra, e per la sua ripetuta, sulla destra.	66
5.29	Deposito finale dell'ammasso granulare costituito da materiale granulare zeolitico per la prima prova eseguita su pendio incanalato, sulla sinistra, e per la sua ripetuta, sulla destra.	66

5.30	Il deviatore di flusso collocato sul piano di valle in prossimità del termine del tratto incanalato, utilizzato nelle prove su pendio incanalato con deviatore di flusso.	67
5.31	Deposito finale dell'ammasso granulare costituito da ghiaia grossa per la prima prova eseguita su pendio incanalato con deviatore, sulla sinistra, e per la sua ripetuta, sulla destra.	68
5.32	Deposito finale dell'ammasso granulare costituito da materiale granulare zeolitico per la prima prova eseguita su pendio incanalato con deviatore, sulla sinistra, e per la sua ripetuta, sulla destra.	68
5.33	Restituzione fotogrammetrica 3D dei punti e codici della canaletta con Australis.	69
5.34	DTM ottenuto in ArcGis a partire dalle coordinate dei punti di Australis. 70	
5.35	Copertura delle videocamere per le prove su pendio aperto. Ogni punto nel modello è visto da almeno tre immagini.	71
5.36	DTM della copertura delle videocamere per le prove su pendio aperto. .	71
5.37	Esempio di mascheramento. Sono visibili anche i marker importati da Australis e ri-referenziati.	73
5.38	Prodotto finale di una restituzione fotogrammetrica con PhotoScan di un istante di tempo arbitrario. Sono visibili i marker importati da Australis e le posizioni delle videocamere in blu.	73
5.39	DTM della canaletta con le sponde, ottenuto con dalle immagini delle videocamere.	74
5.40	DTM dello scivolo con canaletta e deviatore ricostruito con la visuale delle videocamere	74
5.41	A sinistra, il DTM della canaletta ottenuto con le videocamere; a destra, il DTM del materiale ad un certo istante moto.	75
5.42	Il DTM ottenuto dalla fusione del DTM del doppio piano inclinato e del DTM del materiale ad un certo istante del moto (Figura 5.41.	76
5.43	Qui sono mostrati i DTM ottenuti dalle prove su pendio aperto con ghiaia grossa, per ogni istante di tempo considerato.	77
5.44	Qui sono mostrati i DTM ottenuti dalle prove su pendio aperto con ghiaia fine, per ogni istante di tempo considerato.	78
5.45	Qui sono mostrati i DTM ottenuti dalle prove su pendio aperto con zeoliti, per ogni istante di tempo considerato.	79
5.46	Qui sono mostrati i DTM ottenuti dalle prove su pendio incanalato con ghiaia grossa, per ogni istante di tempo considerato.	80

5.47	Qui sono mostrati i DTM ottenuti dalle prove su pendio incanalato con ghiaia fine, per ogni istante di tempo considerato.	81
5.48	Qui sono mostrati i DTM ottenuti dalle prove su pendio incanalato con zeoliti, per ogni istante di tempo considerato.	82
5.49	Qui sono mostrati i DTM ottenuti dalle prove su pendio incanalato con deviatore con ghiaia grossa, per ogni istante di tempo considerato.	83
5.50	Qui sono mostrati i DTM ottenuti dalle prove su pendio incanalato con deviatore con zeoliti, per ogni istante di tempo considerato.	84
5.51	Andamento dei volumi occupati dall'ammasso granulare, in alcuni istanti di tempo, per le prove su pendio aperto. In alto, nel caso di ghiaia grossa, al centro, nel caso di ghiaia fine e, in basso, nel caso di materiale zeolitico.	85
5.52	Andamento dei volumi occupati dall'ammasso granulare, in alcuni istanti di tempo, per le prove su pendio incanalato senza deviatore di flusso. In alto, nel caso di ghiaia grossa, al centro, nel caso di ghiaia fine e, in basso, nel caso di materiale zeolitico.	86
5.53	Andamento dei volumi occupati dall'ammasso granulare, in alcuni istanti di tempo, per le prove su pendio incanalato in presenza di deviatore di flusso. In alto, nel caso di ghiaia grossa e, in basso, nel caso di materiale zeolitico.	87
6.1	Restituzione fotogrammetrica di un tratto dell'alveo del rio Acquabona alla quota della stazione di valle del sistema di monitoraggio, alla data del 25 maggio 2015.	92
6.2	Parte dell'alveo del rio Acquabona interessata dalla forma ondulata del fondo, ottenuta dalla restituzione fotogrammetrica di Figura 6.1.	92
6.3	Rappresentazione planimetrica di un tratto del rio Acquabona nei pressi della stazione di valle.	92
6.4	Funzione campionata ottenuta dalla elaborazione di Figura 6.3.	93
6.5	Parte reale e parte immaginaria della Trasformata di Fourier della funzione campionata ottenuta.	94
6.6	Restituzione fotogrammetrica della frana rilevata in sponda destra del rio Acquabona poco a valle della formazione di Raibl, il 18 marzo 2015.	95
6.7	Altezze di precipitazione giornaliera come media dei valori ai pluviometri e valore corrispondente come media delle previsioni nei tre giorni precedenti.	96

6.8	Cumulata dei valori medi delle precipitazioni ai pluviometri e dei valori medi delle precipitazioni previste nei tre giorni precedenti.	97
-----	---	----

Elenco delle tabelle

4.1	Le massime intensità di precipitazione oraria per periodi di 1 min., 2 min., 5 min., 10 min., presso il pluviometro di monte e il pluviometro di valle, durante l'evento dell'8 agosto 2015.	32
4.2	Intensità massima di precipitazione oraria su periodi di 1 min., 2 min., 5 min., 10 min. dell'evento di pioggia del 4 agosto 2015.	40
4.3	Tabella che rappresenta i millimetri di precipitazione caduti durante gli eventi verificatisi il 4 Agosto, il 15 agosto, il 16 agosto ed il 17 agosto 2015 rapportati alla durata dell'evento ed alla presenza di ruscellamento superficiale.	40
5.1	Risultati della calibrazione delle videocamere ottenuti mediante l'uso del software Australis.	60
5.2	Risultati della calibrazione della macchina fotografica Canon ottenuti mediante l'uso del software Australis.	60
5.3	Risultati della calibrazione delle videocamere ottenuti mediante l'uso del software Australis e impostando a 0,05 mm (anziché 0,044 mm) la lunghezza del lato del pixel della CCD della telecamera.	61
5.4	Elenco delle prove e codici identificativi utilizzati.	62

Capitolo 1

Introduzione

L'interazione tra uomo ed ambiente è, da molto tempo, causa di dibattito specialmente nel caso di eventi eccezionali quali frane, colate di detrito, piene, valanghe che nel nostro territorio nazionale minacciano sempre di più le attività antropiche causando, spesso, danni a persone e cose. Per questo è importante studiare gli eventi naturali che si verificano sul territorio e le leggi che li governano.

Le aree montuose presentano un'elevata propensione al verificarsi di tali eventi eccezionali creando elevato rischio per le attività umane. Lo studio di fenomeni come le colate di detrito ha come obiettivo quello di fornire strumenti e conoscenze che consentano di valutare sia il rischio a cui sono soggette determinate aree che l'efficacia dei possibili interventi di protezione.

Capitolo 2

Inquadramento Geografico

Il sito di Acquabona si colloca a nord del Veneto, nella Valle del Boite, circa 5-6 km a SE dal centro dell'abitato di Cortina d'Ampezzo e altrettanto a NW dell'abitato di San Vito di Cadore, in Provincia di Belluno. Gli eventi di colata di detrito si verificano in sinistra orografica del fiume Boite e, nel caso del rio Acquabona, interessano una zona compresa tra un'altitudine di 1750 m s.l.m. a livello della zona di alimentazione, ad un'altitudine di 1128 m s.l.m. in corrispondenza della vasca di ritenzione dei sedimenti, esattamente adiacente alla strada statale SS51 Alemagna. La zona di alimentazione è interna al Gruppo montuoso del Sorapiss, versante sud-occidentale, ed è costituita da un canalone profondamente inciso che si va via via restringendo man mano che si scende verso valle, proseguendo per circa 1600 m [1] [2].

La vasca di ritenzione si trova circa a $46^{\circ}30'17,15$ di latitudine Nord e $12^{\circ}9'47,11$ di longitudine Est, mentre la zona di alimentazione si trova circa a $46^{\circ}30'46,81$ di latitudine Nord e $12^{\circ}10'46,04$ di longitudine Est (Figura 2.1).



Figura 2.1: Collocazione geografica del canale di Acquabona. Attraverso i segnaposto sono evidenziate le posizioni della vasca di accumulo e del bacino di alimentazione. (da Google Earth).

Capitolo 3

Inquadramento Geologico

L'area di studio si trova all'interno delle Dolomiti Venete (Figura 3.2). Localmente sono presenti rocce prevalentemente del Triassico Superiore, periodo compreso tra 237 e $201,3 \pm 0,2$ MA fa. Più precisamente le formazioni che interessano l'area di studio si dividono tra le Età del Carnico, Norico e Retico. Secondo l'ultimo aggiornamento della Geological Stratigraphic Chart, all'Età Carnico è stata attribuita una durata di circa 10 MA tra 237 e 227 MA fa, all'Età del Norico una durata di circa 18,5 MA ed è quindi compreso tra 227 e 208,5 MA fa, infine, all'Età del Retico è stata attribuita una durata di circa 7 MA compresi tra 208,5 e 201,3 MA fa.

Dalla osservazione delle rocce affioranti, si possono distinguere due formazioni rocciose principali:

- Formazione di Travenanzes (chiamata originariamente Formazione di Raibl, Figura 3.1), costituita da siltiti, argilliti e marne varicolori (rosse, verdi, grigie) alternate a minori dolomie bianche afanitiche e a subordinate arenarie e conglomerati (nella parte inferiore della formazione). Localmente sono presenti intervalli a gessi laminati e dolomie cariate. Nei comparti sud-occidentali sono presenti livelli di breccie e paraconglomerati al contatto con la Formazione di Heiligkreuz. Lo spessore varia dai 2 m ai 150 m (Carnico) [3];
- Formazione della Dolomia Principale, formata da dolomie color grigio chiaro ben stratificate costituite prevalentemente dall'alternanza ciclica di unità bioturbate, localmente fossilifere (*Neomegalodon* spp., *Worthenia* sp.) e livelli intersupratidali a laminiti stromatolitiche. Localmente sono presenti impronte di dinosauri ornitischii e teropodi. Lo spessore varia da 500 m a 1000 m (Carnico-Retico) [3];

- Il resto è costituito da depositi quaternari di versante che danno origine a coni di origine mista [3].



Figura 3.1: Affioramento della Formazione di Travenanzes o Raibl all'interno del canale di Acquabona.



Figura 3.2: Dettaglio dell'area di Acquabona presente nella Carta Geologica d'Italia 1:50.000, Foglio 29, Cortina d'Ampezzo (sito ISPRA, 2015).

Capitolo 4

Attività di campo: il canale da colata di detriti del rio Acquabona

4.1 Scopo

L'attività di monitoraggio del rio Acquabona è iniziata alla fine degli anni novanta del secolo scorso [4]. Ha subito successivamente un periodo di attività ridotta, per riprendere con maggiore impegno nel 2010. Lo scopo del monitoraggio consiste nell'osservazione e rilevazione delle caratteristiche fisiche principali delle colate di detriti che si formano nell'area studiata. L'interesse è volto alla caratterizzazione dell'innesco delle colate di detriti (con particolare riguardo agli aspetti idrologici), alla valutazione delle modalità di propagazione degli ammassi granulari (composizione granulometrica della componente solida, descrizione della fase liquida, reologia, velocità), alla descrizione delle modalità di arresto e deposizione (pendenze, volumi, morfologia del deposito).

Nel periodo primavera - estate 2015, il lavoro sul campo ha avuto lo scopo principale di riattivare l'attività di monitoraggio, interrotta nella stagione precedente, a causa dei danneggiamenti subiti dalla strumentazione durante l'inverno 2013-2014, e nel progettare e mettere in atto i passi necessari per la realizzazione di una nuova stazione di monitoraggio in posizione più a monte rispetto alla stazione di valle attualmente attiva, allo scopo di permettere l'analisi di un tratto di colata in zona di scorrimento, zona che, con l'evoluzione del fondo del canale, tende a spostarsi sempre più a monte.

Un altro elemento che ha condizionato notevolmente l'attività di campo è l'attuale situazione di particolare riempimento del canale nella zona della stazione di valle. Al momento dell'installazione del distanziamento presso la stazione di valle, la distanza

tra il punto di vista e il fondo del canale era di circa 3,5 m. Nell'arco di circa 5 anni la distanza si è ridotta notevolmente fino a valori compresi tra 1 m e 1,5 m.

4.2 Il sistema di monitoraggio del rio Acquabona

Nel canale di Acquabona dal 1997 l'Università di Padova, inizialmente in collaborazione con l'USGS, ha eseguito attività di monitoraggio per eventi di colate di detriti, installando apposite stazioni. La storia del monitoraggio è, quindi, molto lunga. Nella fase iniziale, lungo il canale erano presenti tre stazioni [4]. Attualmente le stazioni sono due. Una è collocata a valle, circa 200 m a monte della vasca di ritenzione dei sedimenti, a quota superiore rispetto alla quota della stazione del sistema di monitoraggio iniziale per tener conto del progressivo arretramento della zona di deposito, la seconda è collocata a monte della stazione di monte del precedente sistema di monitoraggio, in corrispondenza della porzione apicale della zona di alimentazione, allo scopo di indagare gli aspetti idrologici più in prossimità dell'area di formazione dell'idrogramma di piena che alimenta il canale di colata.

Queste stazioni sono molto diverse l'una rispetto all'altra e sono così composte:

- La Stazione di Valle: la stazione di valle (Figura 4.1) è composta da un basamento in calcestruzzo in cui è stato collocato un perno cilindrico attraverso lo scavo di un foro. Attorno a questo perno ruota la struttura metallica sovrastante. Per garantire la minor sollecitazione a momento flettente possibile, dalla parte opposta della struttura a sbalzo, è collocato un cassone, anch'esso in metallo, riempito con rocce fino ad un peso tale da controbilanciare il peso della struttura rotante. La struttura a mensola porta strumenti è composta da tre elementi della lunghezza di 2 m imbullonati tra loro. All'estremità di ogni elemento è fissato un tirante collegato con la colonna centrale che contribuisce alla stabilità della struttura. Un quarto tirante è stato utilizzato per sorreggere il cassone in metallo. La strumentazione di misura è collocata all'estremità della mensola metallica ed è costituita da una telecamera, un pluviometro a basculante, un distanziometro laser e la parte ricevente di un ponte radio che permette il collegamento con la stazione di monte. La strumentazione di controllo della strumentazione di misura è presente nei due armadietti adiacenti (Figura 4.2). Questi sono riparati da una barriera parasole in polistirene espanso con lo scopo di mantenere, per quanto possibile, bassa la temperatura all'interno degli armadietti (le misure di temperatura effettuate durante gli anni mediante un termometro a massima e

minima posizionato all'interno degli armadietti, in assenza dell'ombreggiatore, hanno fornito valori fino a 55°C). La strumentazione interna è costituita da un gruppo di continuità (collocato in uno degli armadietti) che fornisce energia a due alimentatori, i quali forniscono energia all'apparato di controllo della strumentazione costituito da un computer industriale della Diamond System Helios con a bordo il sistema operativo Slackware Linux, un router e un hard disk esterno da 1 TB. Questi componenti di controllo sono collegati tramite cavi ethernet e mediante cavi segnale e di alimentazione alla telecamera, al pluviometro a basculante, al distanziometro laser (la stazione è predisposta anche per l'installazione di un pluviometro ad ultrasuoni) e al ponte radio, posti all'estremità della mensola metallica (Figura 4.3). La corrente elettrica arriva alla stazione per mezzo di un cavo sospeso legato ad alcuni alberi fatto poi passare sotto terra in corrispondenza della stazione fino al primo armadietto, dove è collegata al gruppo di continuità. La corrente ed il contatore associato sono stati forniti dal Comune di Cortina d'Ampezzo. Alla stazione di misura arrivano altri quattro cavi segnale che conducono a quattro postazioni per il rilevamento dei tempi di passaggio delle colate. Le postazioni distano circa 100 m l'una dall'altra. La prima è posta a valle della stazione, la seconda alla stazione, le altre due a monte. In una fase iniziale (durante la stagione 2011 - 2012) sono stati utilizzati dei geofoni per la misura dei tempi di passaggio senza ottenere risultati utili al monitoraggio e inducendo ad interrompere, temporaneamente, il loro utilizzo. Il controllo della stazione è possibile a distanza mediante una SIM dati connessa alla rete 3G localmente disponibile. Anche la scheda SIM, ed il relativo contratto flat, è stata fornita dal comune di Cortina d'Ampezzo.

- Stazione di Monte: si trova su di un picco roccioso, in una situazione abbastanza impervia, ad un'altitudine di circa 1715 m s.l.m.. Per aiutare nella costruzione ed in generale per favorire in futuro anche il raggiungimento della stazione con un minimo di sicurezza, il Comune di Cortina d'Ampezzo ha contribuito alla costruzione di un piccolo percorso ferrato. In questo caso la corrente elettrica non arriva mediante cavi, ma mediante conversione fotovoltaica attraverso due pannelli solari da 20 W. La stazione si compone di due pali di acciaio galvanizzato a cui è fissata la strumentazione. In particolare sul primo palo troviamo i pannelli solari e gli armadietti contenenti la strumentazione, sul secondo era installata una stazione meteorologica, detta Vaisala, che permetteva acquisizione contemporanea di dati riguardo le precipitazioni, direzione e velocità del vento,

temperatura e pressione dell'aria e umidità relativa [4]. Dentro gli armadietti è presente un router che permette, attraverso delle antenne, di reindirizzare i dati verso la stazione di valle tramite ponte radio in modo che possano venire immagazzinati all'interno dell'hard disk presente nella stazione di valle. Questa appena descritta era la situazione della stazione durante l'anno 2014. Nel 2015 è stato sostituito il Vaisala con un più semplice pluviometro a basculante, inoltre, a causa delle nevicate invernali, la stazione di monte è stata pesantemente danneggiata. Il palo in acciaio contenente gli armadietti, infatti, è stato piegato ed un pannello solare risultava mancante. La situazione della stazione è visibile in Figura 4.4. Le riparazioni sono ancora in corso.

- **Stazione Intermedia:** non è ancora presente una stazione intermedia, ma si è intenzionati ad installarne una, circa 200 m più a monte rispetto alla stazione di valle (Figura 4.5). L'idea è quella di mantenere l'assetto della stazione di valle rendendo l'intera struttura più leggera utilizzando alluminio e meno pali. La prima cosa da accertare è se il Comune di Cortina D'Ampezzo potrà riuscire in tempi brevi a portare la corrente dalla stazione di valle fino alla stazione intermedia, il che faciliterebbe non poco la costruzione del basamento e di tutto il necessario per rendere operativa la stazione, per non parlare della contrazione dei costi. In ogni caso l'idea è quella di collocare un maggior numero di telecamere per poter fare fotogrammetria dinamica in 3D direttamente sul campo, un certo numero dovrà guardare verso monte e le rimanenti verso valle, inoltre verrà installato un distanziometro laser ed un pluviometro.

4.3 Attività ed osservazioni di campo

Il lavoro sul campo è stato svolto in numerose uscite, alcune finalizzate agli interventi necessari per l'installazione ed il controllo della strumentazione, altre per il controllo delle condizioni del canale di colata.

22 ottobre 2014: La prima uscita è stata effettuata il 22 ottobre 2014, in un periodo pre-invernale durante il quale la stazione non era attiva. L'uscita ha permesso di osservare i depositi di una colata verificatasi, verosimilmente, qualche giorno prima (Figura 4.6). Nella parte terminale del canale i depositi avevano una colorazione rossastra derivata dall'erosione della formazione di Travenanzes. Più a monte il colore tendeva al bianco-giallo, derivato dallo smantellamento della



Figura 4.1: Assetto della stazione di valle il giorno 19/06/2015.

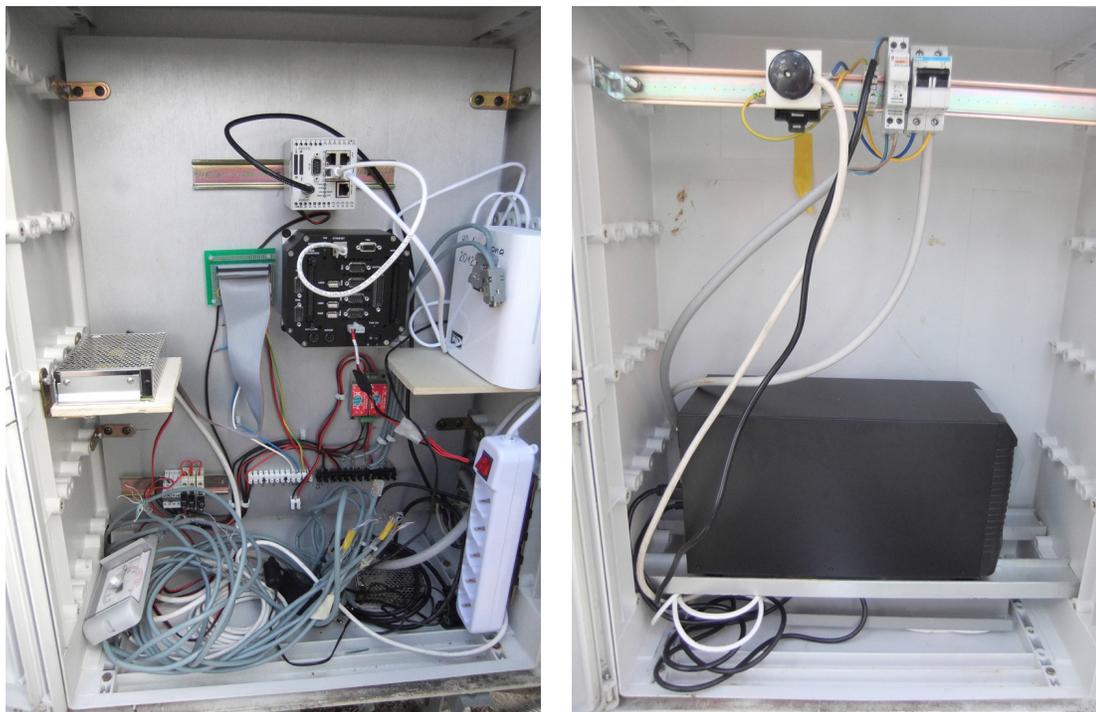


Figura 4.2: Strumentazione della stazione di valle. A sinistra sono visibili il computer, il router, i due alimentatori, l'hard disk e il termometro di massima e minima. A destra è visibile il gruppo di continuità collegato alla corrente.



Figura 4.3: Strumentazione esterna della stazione di valle. Sono visibili un pluviometro a basculante, una telecamera ed un laser.



Figura 4.4: Danni riportati dalla stazione di monte.



Figura 4.5: Probabile posizione della stazione intermedia, in cima al masso più a sinistra sullo sfondo.

Formazione della Dolomia Principale dalla parte sommitale del massiccio del Sorapiss. Durante questa uscita si è proceduto allo smontaggio degli elementi di supporto delle due stazioni e le stesse sono state preparate alla ormai prossima stagione invernale. Presso la stazione di monte sono stati eseguiti i rilievi dei danneggiamenti subiti durante la precedente stagione invernale sia dei pannelli fotovoltaici che dei relativi pali di supporto. Durante la discesa a valle sono state identificate le possibili zone dove collocare la nuova stazione intermedia.

18 marzo 2015: L'uscita del 18 marzo 2015 ha avuto lo scopo di valutare le condizioni della strumentazione nella fase finale della stagione invernale. È stata verificata la disponibilità della corrente di alimentazione presso la presa delle Regole d'Ampezzo e l'integrità del cavo di alimentazione della stazione di valle. È stata verificata anche la possibilità di riutilizzo di un armadietto (Figura 4.7) e di alcuni pali di supporto che facevano parte delle installazioni del primo sistema di monitoraggio (fine secolo scorso). Il gruppo di continuità, non più funzionante, è stato prelevato dalla stazione e riportato in sede. Nel salire verso la parte alta del bacino è stato possibile osservare e registrare una valanga di neve primaverile granulare verificatasi nella parte alta delle pareti rocciose del Sorapiss (Figura 4.8). Non è stato possibile raggiungere la stazione di monte a causa del peri-



Figura 4.6: Depositi di colata rilevati il 22 ottobre 2014.

colo rappresentato dalla ancora abbondante neve presente. La verifica della sua integrità è stata eseguita a distanza mediante un binocolo.



Figura 4.7: Armadietto facente parte della stazione di valle del sistema di monitoraggio di fine secolo scorso e di cui è previsto il riutilizzo nell'ambito della realizzazione della nuova stazione intermedia.

20 maggio 2015: Il 20 maggio 2015 sono stati eseguiti, presso il Dipartimento di Geoscienze, i test di verifica del corretto funzionamento dei componenti da montare presso la stazione di valle, in vista della nuova stagione di monitoraggio. In questa occasione è stato rilevato un problema di accesso, via internet, al sito della stazione. Problema questo non di poco conto, considerando che avrebbe inibito la possibilità di controllo a distanza della stazione e quindi anche la possibilità di intervenire tempestivamente in caso di necessità. Il problema è stato affrontato in collaborazione con il Comune di Cortina d'Ampezzo e richiedendo l'intervento del gestore della SIM dati al fine di ripristinare la possibilità di accesso all'IP della SIM dati, negato, senza preavviso, durante una recente fase di riorganizzazione del servizio.



Figura 4.8: Valanga di neve granulare filmata durante l'escursione del 18 marzo 2015.

25 maggio 2015: Il giorno 25 maggio 2015 è stato dedicato al montaggio della struttura di supporto della strumentazione della stazione di valle. Sono state inoltre rilevate fotograficamente le forme di fondo presenti in alveo nella zona della stazione di valle con lo scopo di analizzarle fotogrammetricamente.

18 giugno 2015: Verifica finale dell'operatività della strumentazione in vista del montaggio in sito previsto per il giorno successivo. Il problema dell'accesso internet alla stazione non è stato ancora risolto.

19 giugno 2015: Uscita sul campo per il montaggio della strumentazione della stazione di valle. Arrivati alla stazione è stata osservata la presenza, nella zona della stazione di valle, di un deposito recente, dovuto, con ogni probabilità, ad una colata verificatasi in occasione delle piogge della settimana precedente. Nella configurazione rilevata la distanza tra la struttura di supporto della strumentazione ed il fondo del canale era di circa 1,5 m (Figura 4.9) e quindi meno della metà della distanza osservata in occasione del montaggio della stazione, avvenuto circa cinque anni prima. La situazione è stata giudicata ad elevato rischio, sia per la possibilità di esondazione in occasione di un nuovo evento (come avvenuto nel 2009), sia per la possibilità di danneggiamento o distruzione della strumentazione installata. La situazione attuale è stata formalmente comunicata al Comune di Cortina d'Ampezzo e alle Regole d'Ampezzo, sollecitando la rimozione del materiale presente in alveo e ripristinando un alveo che con maggiore probabilità permettesse al materiale di colata di raggiungere la vasca di deposito finale. È

stata presa in considerazione anche l'ipotesi di rimuovere la strumentazione di valle e la struttura di supporto e di sistemarla in zona più sicura (nell'area designata per il montaggio della stazione intermedia), almeno fino all'esecuzione dell'intervento di pulizia dell'alveo. La decisione è stata infine rinviata in considerazione della visita di studio prevista per il giorno successivo nell'ambito di un Master sul Rischio Idrogeologico organizzato dall'Università La Sapienza di Roma. L'uscita ha permesso, infine, di osservare nell'area subito a valle rispetto al rio Acquabona, sullo stesso versante di sinistra del Boite, un recente significativo nuovo deposito, testimoniato dal colore candido dei depositi, ai piedi delle pareti di roccia (Figura 4.10).



Figura 4.9: Il rio Acquabona nella zona della stazione di valle il 19 giugno 2015 (vista da valle verso monte).

23 giugno 2015: Il giorno 23 giugno 2015, in località Acquabona, alle ore 17.00 circa, a seguito di una breve e intensa precipitazione, si è verificato un evento di colata (Figura 4.11) che ha occupato la strada statale Alemagna. L'evento non ha riguardato il rio Acquabona, ma la zona adiacente subito a valle, della cui attività si è descritto durante l'uscita del 19 giugno. La colata non ha provocato danni a persone.



Figura 4.10: Nuovi depositi di colata adiacenti al canale di Acquabona. La deposizione è avvenuta nelle settimane precedenti al 19 giugno 2015.



Figura 4.11: Colata di detriti del 23 giugno 2015 in località Acquabona, poco a valle del rio Acquabona.

7 luglio 2015: Il 7 luglio 2015 sono stati acquisiti tre pluviometri a basculante standard, dotati di un datalogger interno alimentato da batterie ricaricabili al litio con autonomia dichiarata di 2 anni. Gli stessi sono inoltre dotati di un piccolo pannello solare per il mantenimento della carica della batteria. Gli strumenti verranno collocati presso la stazione di monte, in prossimità della stazione intermedia in studio e in una posizione ad altitudine intermedia rispetto alle due. L'obiettivo è di acquisire, durante l'attuale stagione di monitoraggio, dati meteorologici che permettano di dare continuità allo studio dell'andamento della precipitazione in funzione della posizione e della quota nel bacino monitorato e di ottenere ulteriori informazioni sulla relazione tra le piogge e gli eventi di colata.

8 luglio 2015: L'8 luglio 2015 si è verificato un altro evento di colata (Figura 4.12) in zona prossima a quella dell'evento del 23 giugno. La colata, verificatasi poco dopo le 17.00, ha raggiunto in due punti la strada statale 51 Alemagna. La sua intensità è stata molto maggiore della colata del 23 giugno e la lunghezza di occupazione della strada molto maggiore. Nell'evento sono state coinvolte due macchine senza conseguenze per i conducenti.



Figura 4.12: Colata di detriti dell'8 luglio 2015 in località Acquabona, poco a valle del rio Acquabona.

16 luglio 2015: Il 16 luglio 2015 è stata effettuata un'uscita sul bacino del rio Acquabona finalizzata all'installazione dei tre pluviometri. Il primo pluviometro è stato collocato in prossimità della posizione scelta per l'installazione della stazione intermedia; il secondo è stato collocato alla quota dell'affioramento della formazione di Travenanzes, in sinistra orografica di un canale pensile affluente del

canale principale del rio Acquabona, il terzo in corrispondenza della stazione di monte. Gli strumenti sono stati collocati alla quota di circa 2 m dal suolo, su tubi in acciaio predisposti per il fissaggio degli strumenti. Sono state documentate le rispettive posizioni attraverso punti GPS. Le posizioni sono visibili in Figura 4.13, mentre in Figura 4.14 sono mostrati i tre pluviometri nelle loro posizioni di installazione. Nella zona di deposito nei pressi della stazione di valle, è stata osservata una significativa attività di erosione nella zona centrale del canale, verificatasi successivamente al 19 giugno precedente (Figura 4.15), in occasione delle piogge che poco più a valle avevano causato due eventi di colata con interessamento della strada. Anche per questa ragione è stato deciso di mantenere la struttura di supporto della stazione di valle in posizione. Durante la visita al bacino è stato osservato (Figura 4.16) uno sbarramento naturale, a monte della formazione di Travenanzes, con un notevole deposito a monte, che se rimosso può contribuire, mediante un meccanismo del tipo dam-break, alla formazione di una colata di dimensioni significative.

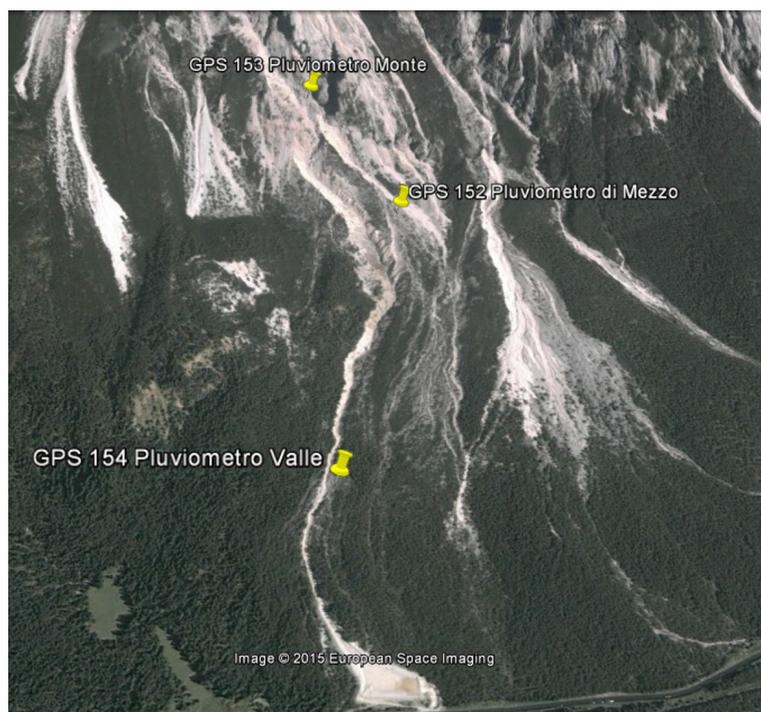


Figura 4.13: Posizione dei pluviometri lungo il canale.

28-29 luglio 2015: Il 28 luglio è stato dedicato alla visita del canale di colata di Acquabona con lo scopo di predisporre a terra dei Control Points, realizzati



Figura 4.14: Assetto dei tre pluviometri. In alto a sinistra è visibile il pluviometro di valle, a destra quello di mezzo ed in basso a sinistra quello di monte.



Figura 4.15: La situazione del canale di Acquabona in prossimità della stazione di valle il 16 luglio 2015.



Figura 4.16: Lo sbarramento (a sinistra) che crea accumulo di sedimento più a monte (a destra).

con vernice di colore arancione, con il fine di realizzare analisi fotogrammetriche sfruttando le immagini riprese da elicottero durante il volo previsto per il giorno successivo (Figura 4.17). I Control Point sono stati rilevati con un GPS di bassa precisione. Per l'esecuzione della analisi fotogrammetrica è necessario il rilievo con strumentazione maggiormente precisa. Durante l'uscita è stato osservato un secondo accumulo (Figura 4.18) indotto da uno sbarramento naturale a valle della Formazione di Travenanzes. L'uscita in elicottero, effettuata in collaborazione con il Comune di Cortina d'Ampezzo, ha permesso di ottenere una visione più completa del canale di colata del rio Acquabona e di osservare la nuova attività sviluppatasi nelle settimane precedenti nei versanti adiacenti verso l'abitato di San Vito.



Figura 4.17: Un control point predisposto per l'analisi fotogrammetrica del canale di colata.



Figura 4.18: Lo sbarramento con accumulo di materiale a monte nella zona a valle della formazione di Raibl.

5 agosto 2015: Il giorno 5 agosto 2015, a seguito di precipitazioni incredibilmente intense, si sono susseguiti tre eventi di debris flow. Uno è avvenuto a San Vito di Cadore, un secondo evento si è sviluppato a Cancia ed un terzo ad Auronzo. L'evento più grande è stato quello di San Vito (Figura 4.19) che ha causato tre morti travolgendo tre autovetture.



Figura 4.19: Colata di San Vito di Cadore del 5 agosto 2015.

29 agosto 2015: L'uscita è stata effettuata per la raccolta dei dati di precipitazione dei tre pluviometri. I dati sono stati scaricati dallo strumento di valle e dallo strumento di monte, mentre non erano disponibili presso la stazione a quota intermedia, a causa di un malfunzionamento della scheda SD all'interno dello strumento. L'uscita ha permesso di assistere a due frane di crollo, a breve distanza temporale l'una dall'altra, testimoniate dal rombo provocato e dalla successiva nube di polvere, nella parte alta delle pareti del Sorapiss.

14 settembre 2015: Il 14 settembre 2015, poco prima delle 7:00, si è verificato un evento di colata che ha interessato il canale neoformato adiacente al rio Acquabona (Figura 4.21). La colata ha travolto alcune macchine parcheggiate, fortunatamente senza conducenti. La strada statale SS51 Alemagna è rimasta chiusa per tutta la giornata.

4.3.1 Osservazioni morfologiche sul rio Acquabona

Di seguito vengono descritte alcune osservazioni di campo sui processi deposizionali che si sviluppano all'interno del canale di colata.



Figura 4.20: Foto della nube di polvere creata da una frana di crollo sulle pareti rocciose del Sorapiss il 29 agosto 2015.



Figura 4.21: La protezione civile al lavoro sui depositi lasciati dalla colata di detrito del 14 settembre 2015.

- Accumulo regressivo: la parte del canale subito a monte del bacino di ritenzione dei sedimenti è caratterizzata, ad eccezione dell'ultimo tratto, da pendenze molto basse. Questo ha causato un accumulo di sedimento che si interrompe poco prima della zona di cambio di pendenza e può ostacolare la consegna del materiale alla vasca di accumulo. Il processo di accumulo tende ad estendersi, nella fase attuale, sempre più verso monte. Il riempimento del canale fino a quote molto prossime alle sponde laterali nella zona della stazione di valle, può portare alla esondazione di nuovi eventi, come già verificatosi nel luglio del 2009. La situazione descritta è rappresentativa dell'alveo al 19 giugno 2015. Eventi di pioggia successivi hanno prodotto una significativa erosione nella parte centrale del canale che è stata nuovamente saturata con l'evento dell'8 agosto. La situazione più recente è visibile in Figura 4.22.



Figura 4.22: Il canale di colata in prossimità della stazione di valle, il 22 agosto 2015. A sinistra: il deposito si interrompe nella zona della stazione di valle; a destra: la quota del deposito è prossima alla quota delle sponde.

- Sbarramento naturale 1: poco a valle della Formazione di Travenanzes si è formato un deposito significativo a monte di alcuni massi di dimensioni metriche. Un'eventuale movimentazione dello sbarramento naturale metterebbe a dispo-

sizione di una eventuale colata una notevole quantità di materiale. In Figura 4.23 è mostrata la situazione del deposito al 28 luglio 2015.



Figura 4.23: Accumulo a monte di uno sbarramento naturale formatosi a valle della formazione di Travenanzes.

- Sbarramento naturale 2: a monte della Formazione di Travenanzes è presente una situazione simile alla precedente solo che in questo caso sembra, almeno ad una prima occhiata, che coinvolga, ad una valutazione preliminare, volumi molto maggiori. In Figura 4.24 è mostrata la situazione dell'alveo al 28-29 luglio 2015.



Figura 4.24: A sinistra, una vista da valle dello sbarramento naturale che causa l'accumulo rilevata il 28 luglio 2015; a destra, una vista aerea dell'accumulo ottenuta il 29 luglio 2015.

Il tentativo di eseguire una stima dei volumi del deposito di monte con tecniche fotogrammetriche non ha condotto a risultati soddisfacenti a causa della bassa qualità di varie immagini, scattate in condizioni di tempo avverse e in presenza di nubi basse nella parte alta del bacino.

4.4 I problemi riscontrati durante il monitoraggio

La descrizione degli eventi di colata verificatisi nella stagione 2015 mediante la strumentazione del sistema di monitoraggio è stata notevolmente limitata dalla situazione critica dell'alveo nella zona della stazione di valle. Il rischio di esondazione con la possibilità concreta di interessamento della strumentazione della stazione ha indotto ad un uso ridotto della stessa e alla descrizione delle condizioni del canale mediante frequenti uscite sul posto.

Il sito internet realizzato presso la stazione di valle è stato a lungo fuori rete a causa della impossibilità di accedere all'IP dinamico assegnato dalla TIM alla SIM dati fornita dal Comune di Cortina d'Ampezzo. La riattivazione del servizio è avvenuta verso la metà di luglio.

La ragione principale che ha suggerito l'utilizzo limitato del sistema di monitoraggio è comunque stata rappresentata dalla situazioni dei depositi nel canale. Durante l'escursione del 19-20 giugno 2015, durante la quale era previsto il montaggio dei sensori e della strumentazione di controllo presso la stazione di valle, è stato osservato l'elevato grado di riempimento del canale. In quella occasione la distanza tra l'obiettivo della telecamera e il fondo del canale si era ridotto a circa 1,5 m contro i circa 3,5 m in occasione del primo montaggio della stazione avvenuto nel 2011. Della situazione è stata data comunicazione al Comune di Cortina d'Ampezzo e alle Regole d'Ampezzo, sollecitando una celere rimozione del materiale d'alveo, al fine di ripristinare la funzione del canale di consegna alla vasca di deposito finale.

L'evento di colata del 23 giugno 2015, verificatosi nelle immediate vicinanze, con interessamento della strada statale Alemagna, ha indirizzato gli sforzi nella attività di ripristino della sede stradale. Gli eventi successivi hanno poi tenuto occupate le amministrazioni locali durante tutto il periodo estivo. Dopo l'evento di colate interno al rio di Acquabona dell'8 agosto scorso la situazione di pericolo di esondazione è stata accentuata. Questa è ancora la situazione alla fine di settembre 2015.

Una attivazione parziale della stazione di valle è stata attuata a partire dal 28 luglio 2015, rispondendo anche alla sollecitazione del Comune di Cortina d'Ampezzo di fornire un punto di osservazione per il monitoraggio del rio Acquabona. In quella

occasione la struttura di supporto è stata posizionata in direzione longitudinale per ridurre il rischio di coinvolgimento in un evento di colata. La telecamera (Figura 4.25) è stata orientata verso il canale coprendo un tratto d'alveo di circa 15 m. Al Comune di Cortina è stata fornita la possibilità di accedere alla telecamera in tempo reale.



Figura 4.25: Visuale della telecamera montata presso la stazione di valle a fine luglio 2015. In alto la sponda destra; in basso, la sponda sinistra.

4.5 La colata di detrito dell'8 agosto 2015

4.5.1 Introduzione

L'8 agosto 2015, a seguito di eventi di precipitazione intensi, si sono verificati due eventi di colata nell'area di Acquabona. Il primo ha interessato il rio Acquabona e non ha provocato esondazione. La telecamera montata sulla stazione di valle è stata in grado di registrare l'evento sul disco fisso locale. La registrazione è stata utilizzata nel seguito per la descrizione dell'evento, in accoppiamento con i dati di pioggia disponibili. Il secondo ha interessato il versante adiacente in direzione San Vito di Cadore. La colata, in questo secondo caso, ha attraversato la strada Alemagna e ha raggiunto il torrente Boite deviandone localmente il percorso.

4.5.2 Analisi sui dati pluviometrici

Per l'evento verificatosi nella notte dell'8 agosto 2015 sono disponibili la registrazione video presso la stazione di valle e i dati di pioggia del pluviometro di valle e del pluviometro di monte. Nella Figura 4.26 e Figura 4.27 è rappresentato l'andamento dell'intensità di precipitazione oraria su periodi di tempo di 2 min, 5 min e 10 min. Nella Tabella 4.1 sono invece riportate le massime intensità di precipitazione verificatesi a monte e a valle per periodi di 1 min, 2 min, 5 min e 10 min. La routine per il calcolo della massima intensità di precipitazione è stata realizzata in proprio, applicando il metodo standard della finestra mobile.

Massimi di Precipitazione Oraria 8 Agosto 2015				
Pluviometro di Monte				
Intervallo di Tempo (min)	1	2	5	10
Ora del Massimo	02:30:40	02:30:40	02:30:16	02:27:29
Intensità Max (mm/h)	180	162	124,8	96
Pluviometro di Valle				
Intervallo di Tempo (min)	1	2	5	10
Ora del Massimo	01:46:02	01:46:02	01:44:57	01:44:41
Intensità Max (mm/h)	72	60	60	48

Tabella 4.1: Le massime intensità di precipitazione oraria per periodi di 1 min., 2 min., 5 min., 10 min., presso il pluviometro di monte e il pluviometro di valle, durante l'evento dell'8 agosto 2015.

4.5.3 Analisi tramite la telecamera

I frames acquisiti dalla telecamera il giorno 8 agosto 2015, alla frequenza di 1 frame ogni 1,6 s (0,625 fps), sono stati scaricati dal disco fisso locale sfruttando il protocollo FTP e la connessione a internet disponibile. In Figura 4.28 è mostrato un frame acquisito durante l'evento. La qualità dell'immagine non elevata è dovuta, in parte, alla necessità di contenere la dimensione dei frame, che devono essere gestibili via internet e, in parte, al fatto che l'evento si è verificato in ore notturne e la scena è illuminata con un illuminatore a led di potenza moderata.

In Figura 4.29 sono rappresentate le intensità di precipitazione, le precipitazioni cumulate alla stazione di valle e di monte durante l'evento dell'8 agosto 2015 e gli

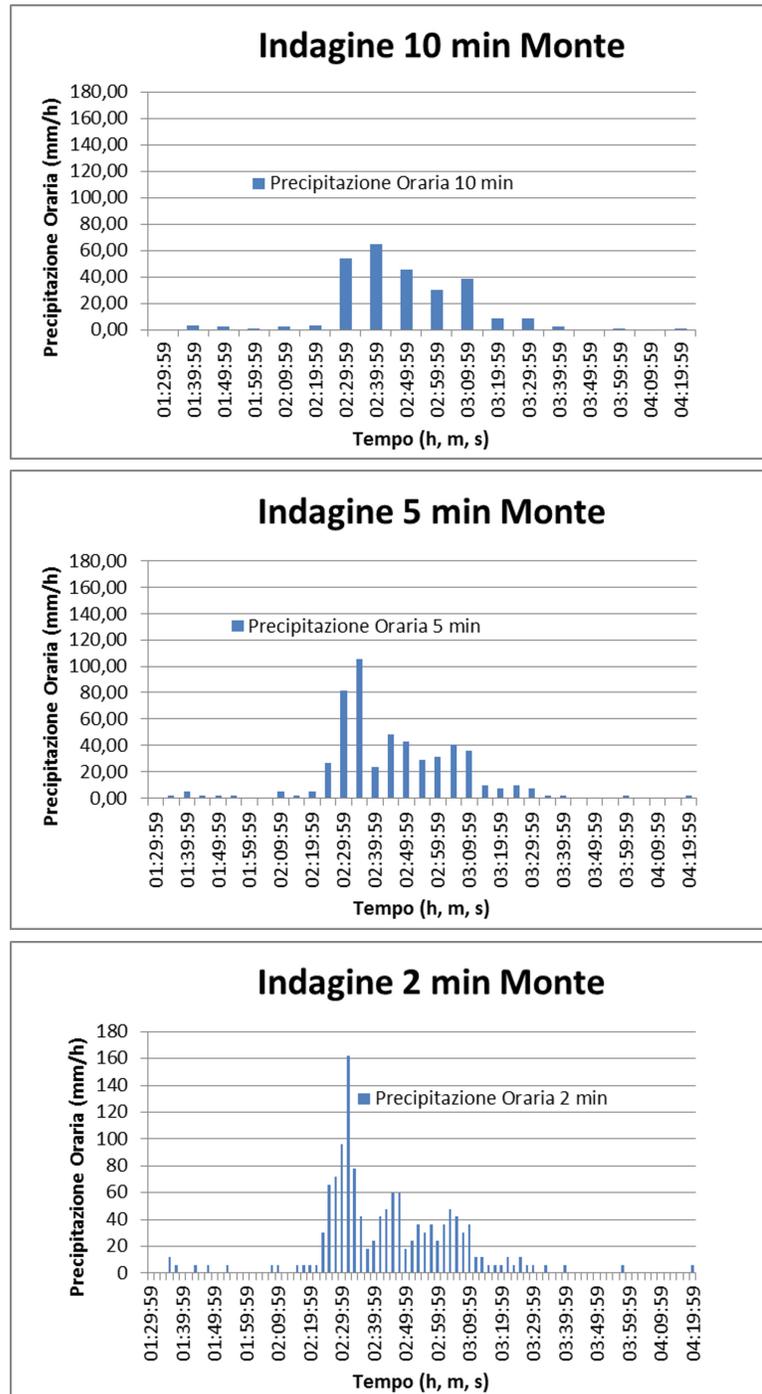


Figura 4.26: Andamento della intensità di precipitazione oraria nel tempo, presso il pluviometro di monte, durante l'evento di pioggia dell'8 agosto 2015. La valutazione è fatta per i periodi di tempo di 2 min., 5 min. e 10 min.

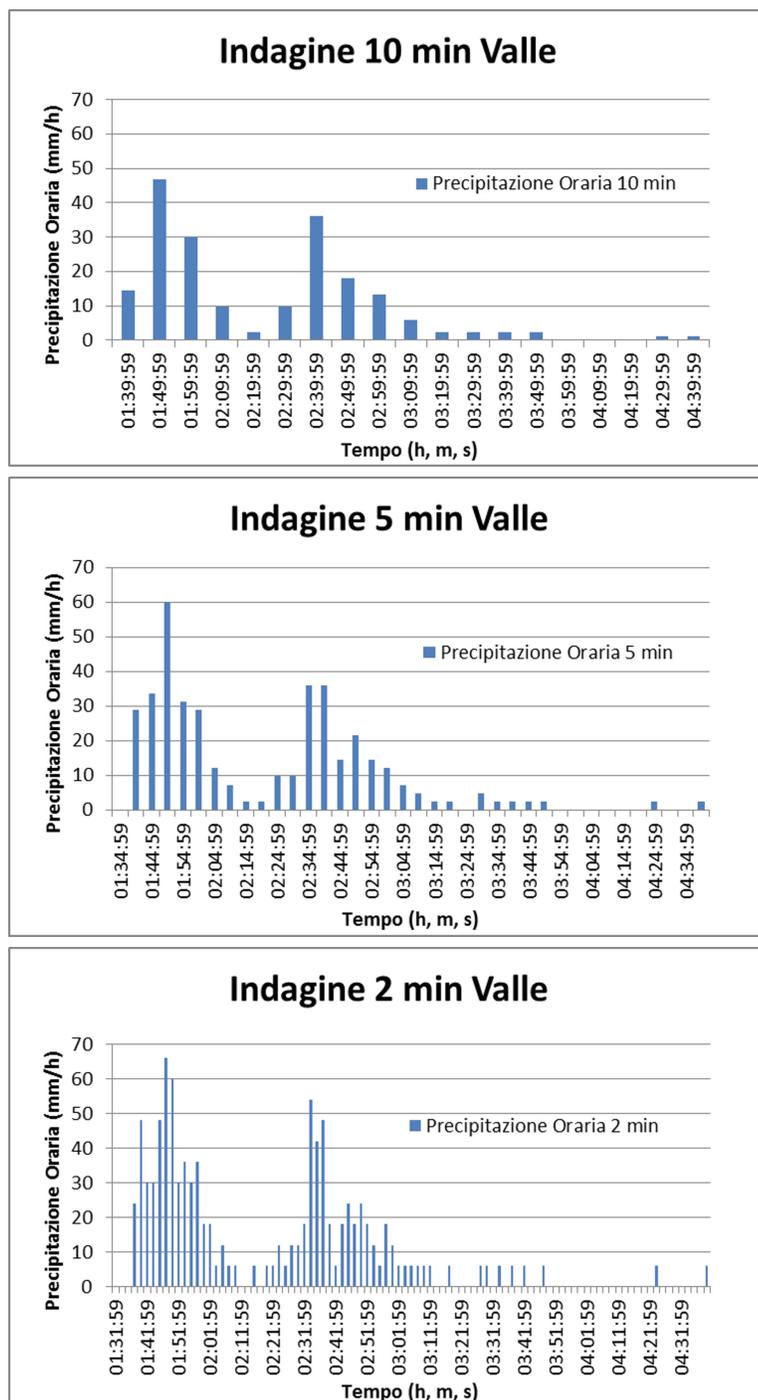


Figura 4.27: Andamento della intensità di precipitazione oraria nel tempo, presso il pluviometro di valle, durante l'evento di pioggia dell'8 agosto 2015. La valutazione è fatta per i periodi di tempo di 2 min., 5 min. e 10 min.



Figura 4.28: Visibilità della telecamera durante la notte.

istanti di inizio degli impulsi di portata liquida e di colata matura durante l'evento, presso la stazione di valle. Di questi è anche riportata una descrizione qualitativa dell'intensità di ogni impulso.

La registrazione dei frame della telecamera è iniziata alla mezzanotte del 7 agosto 2015 quando già è visibile qualche goccia di pioggia. La prima basculata del pluviometro di valle, invece, è stata registrata alle ore 1:31:19.

Un cambiamento nell'intensità della pioggia alla stazione è osservabile dalle ore 1:32:06 seguito da un secondo cambiamento alle ore 1:37:25, che corrisponde, approssimativamente, al primo cambiamento di pendenza della curva cumulata relativa al pluviometro di valle.

Intorno alle 1:44:00 inizia uno scorrimento liquido, di portata molto bassa, nel canale.

Alle 2:05:08 si osserva una decrescita della frequenza delle gocce di pioggia, che trova conferma nel diagramma della cumulata, in questa fase, però, il flusso liquido è molto più sviluppato. L'intensità della precipitazione aumenta nuovamente a partire dalle ore 2:18:49 in accordo con le curve cumulate pluviometriche. Da questo momento l'intensità di precipitazione aumenta progressivamente con sporadici aumenti impulsivi assieme allo scorrimento liquido. Un'aumento repentino si verifica, invece, alle ore 2:33:35 in accordo con i dati pluviometrici di valle.

Alle ore 2:35:00 circa termina il tratto più pendente della cumulata relativa alle

precipitazioni di monte.

Da questo momento in poi il flusso liquido è ben sviluppato, la portata continua ad aumentare fino alle 3:04:27, istante in cui è visibile il primo impulso di colata. Alle 3:06:19 si verifica un secondo impulso di entità minore rispetto al primo.

Il secondo tratto più pendente della cumulata di monte termina alle 3:10:00 circa.

Alle 3:11:31 si osserva un terzo impulso di entità intermedia tra il primo ed il secondo. Un ulteriore quarto impulso si verifica 3:12:43. Alle 3:14:40 un quinto impulso, di intensità poco minore del quarto si esaurisce in modo molto repentino. Il sesto impulso inizia alle ore 3:16:34 e appare poco significativo, così come il settimo impulso che si osserva a partire dalle 3:16:59.

Dalle ore 3:17:37 si osserva un inizio di deposito in corrispondenza degli argini laterali. Alle 3:19:36 i depositi appena formati vengono erosi da un flusso iperconcentrato molto significativo con aumento rilevante di velocità. La portata tende poi a diminuire (sono stati osservati altri casi di diminuzione di portata precedenti ad un impulso, ma di intensità decisamente minore) e alle ore 3:20:47 si verifica un ottavo impulso di piccola entità. Un nono impulso di intensità giudicata media è osservabile alle 3:21:58. La fase di esaurimento di questo impulso è molto ben visibile nei fotogrammi successivi.

Il decimo impulso si verifica alle 3:25:28; la sua intensità è simile a quella dell'ottavo impulso. L'undicesimo impulso, registrato alle 3:25:44, è l'impulso di maggiore intensità. Il movimento della debole componente frontale, che tende ad arrestarsi, viene riattivato dalla fase successiva che spinge il materiale più a valle. Passato l'impulso la portata si riduce velocemente ed inizia un'ulteriore fase di deposizione di argini laterali. In alveo si presenta ora un flusso iperconcentrato che demolisce gli argini appena formati e precede un dodicesimo impulso di colata di entità molto grande, alle ore 3:31:19.

Nella fase successiva si verifica deposizione laterale con restringimento dell'alveo fino alle 3:37:09, istante in cui inizia un nuovo debole impulso di colata, il tredicesimo. La portata d'alveo diminuisce, gli argini rimangono stabili. Un successivo incremento della portata porta al quattordicesimo impulso, alle 3:42:46 di entità media. Si verifica, in seguito, una fase di erosione che demolisce i depositi formati in precedenza. Il quindicesimo impulso si presenta alle 3:44:44, di entità medio-bassa. Il sedicesimo alle 3:46:33, di medie dimensioni.

Fino alle 3:51:48 il flusso in alveo è continuo con restringimento dell'alveo e deposizione in sponda destra. Un ulteriore impulso (il diciassettesimo) di piccola entità è associato allo spostamento del letto del rio Acquabona a causa dell'erosione delle sponde.

Si osservano ora continue deposizioni ed erosioni di materiale fino alle 4:01:56, quando si presenta il diciottesimo impulso, di medio-bassa entità. Il diciannovesimo si verifica alle 4:03:20.

Negli ultimi dieci minuti si è verificato un notevole deposito di materiale in sponda destra.

Si notano, alle 4:10:01, alle 4:12:47 ed alle 4:17:58 degli eventi di deposizione del materiale solido in sospensione, intervallati localmente da eventi erosivi.

A questo punto l'altezza del deposito è aumentata anche nella parte centrale e sinistra del canale.

Da questo momento in poi ricomincia il flusso liquido continuo con deposizione progressiva del materiale. Il completo esaurimento dello scorrimento superficiale si verifica alle ore 5:11:21.

Dai fotogrammi scaricati è stato creato un video attraverso il software Windows Live Movie Maker. Per il video è stata scelta un frame rate di 15 fps, frequenza minima a cui l'occhio non distingue i singoli fotogrammi, che corrisponde ad un'accelerazione del tempo di 24 volte rispetto alla realtà, quindi un fotogramma ogni 0,067 secondi.

4.6 Analisi sui tempi di ritardo tra evento piovoso e ruscellamento a valle

Oltre all'analisi sulla colata dell'8 agosto è stato deciso di analizzare anche altri eventi piovosi precedenti e successivi a tale evento. Tale analisi aveva lo scopo di individuare quali precipitazioni davano luogo a scorrimento superficiale visibile a valle e, in base a questo, stimare i tempi di ritardo dell'arrivo dell'acqua alla telecamera rispetto all'evento piovoso in sé. La telecamera è stata attivata a questo scopo dalla data del 2 agosto 2015 (Figura 4.30) fino alla fine di agosto.

L'unico evento piovoso precedente alla colata che è stato possibile analizzare è quello del 4 agosto. In questo caso la precipitazione comincia alle 19:13:01 a monte ed alle 19:45:28 a valle, secondo i dati dei pluviometri (Figura 4.31). Il passaggio di acqua superficiale inizia attorno alle 19:55:00. Il periodo di elevata intensità di precipitazione si esaurisce circa alle 20:05:00 ed il passaggio d'acqua si arresta attorno alle 22:18:00. La precipitazione finisce alle 00:44:19 a monte ed alle 1:19:52 a valle, del 5 agosto 2015. Come si vede anche dal grafico la precipitazione ha entità modesta, infatti piovono 7,4 mm di pioggia a monte e 9,6 mm a valle. Per quanto riguarda i massimi orari di precipitazione questi sono riportati in Tabella 4.2.

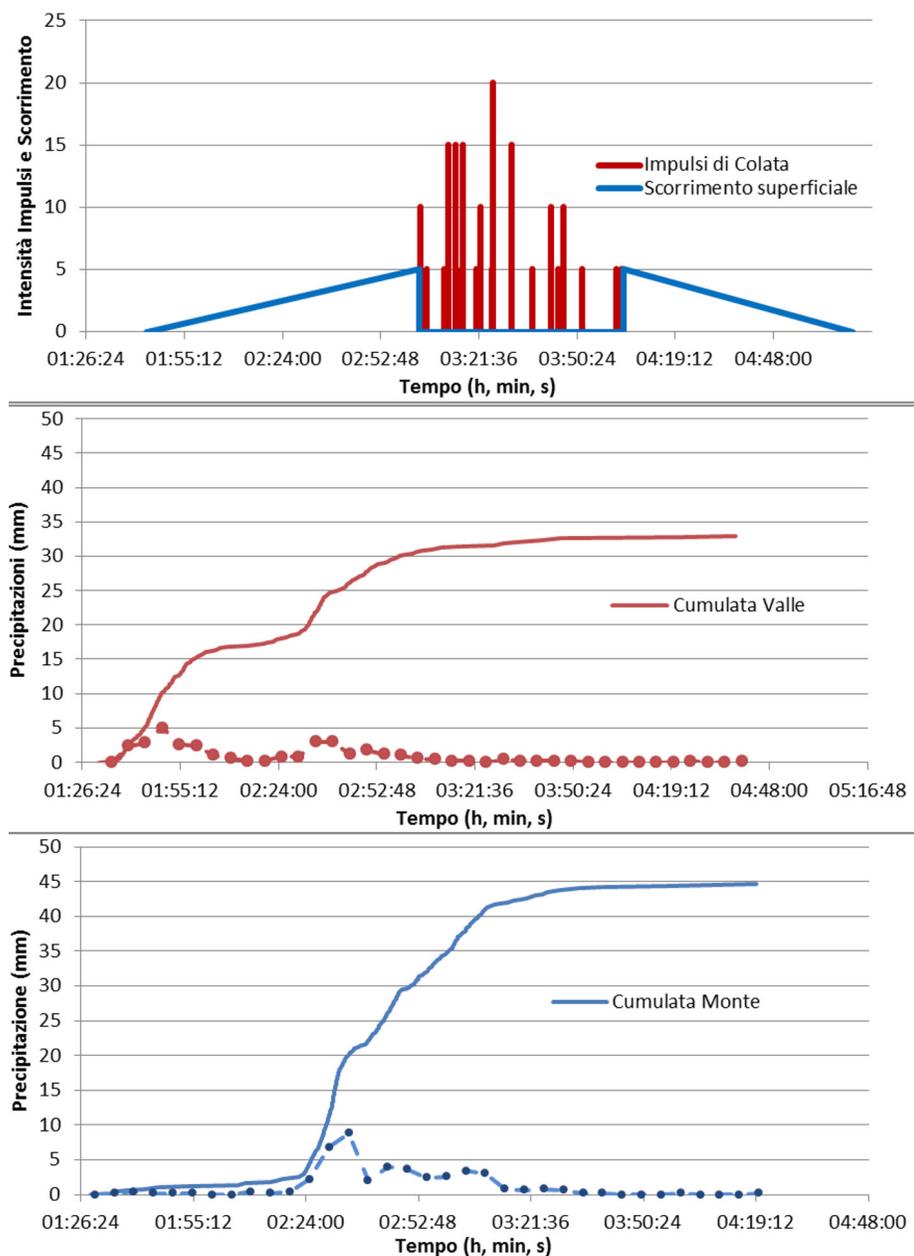


Figura 4.29: Grafico riassuntivo, comprensivo di intensità di precipitazione e cumulate per il pluviometro di monte (sotto) e di valle (in mezzo). Sopra sono anche stati inseriti gli impulsi di colata caratterizzati qualitativamente secondo la loro entità e momento di inizio e fine del flusso idrico.

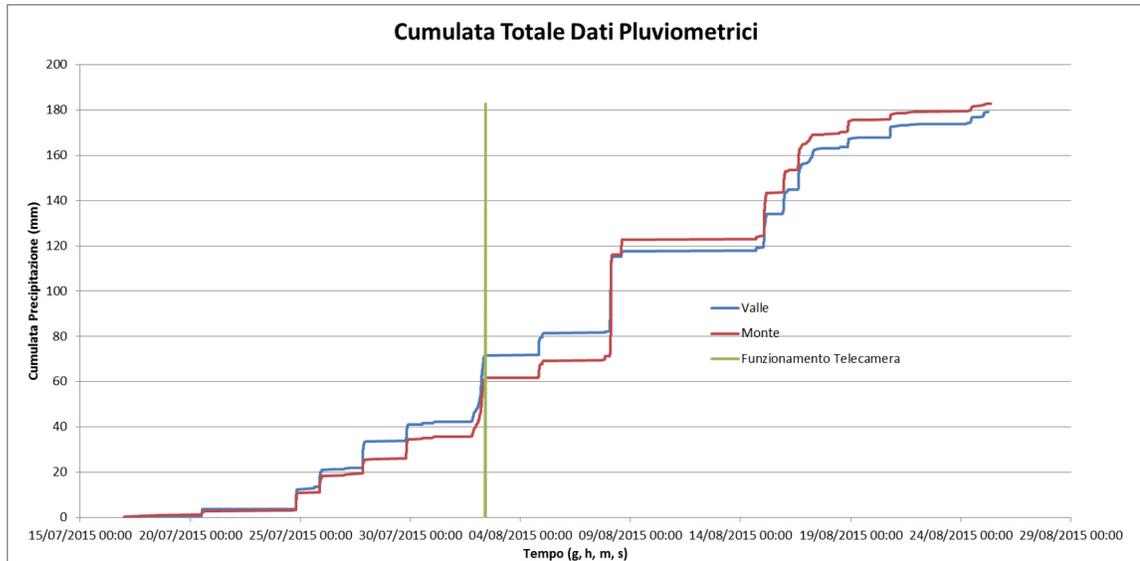


Figura 4.30: Precipitazione cumulata nel periodo considerato di attività dei pluviometri e istante di attivazione della telecamera.

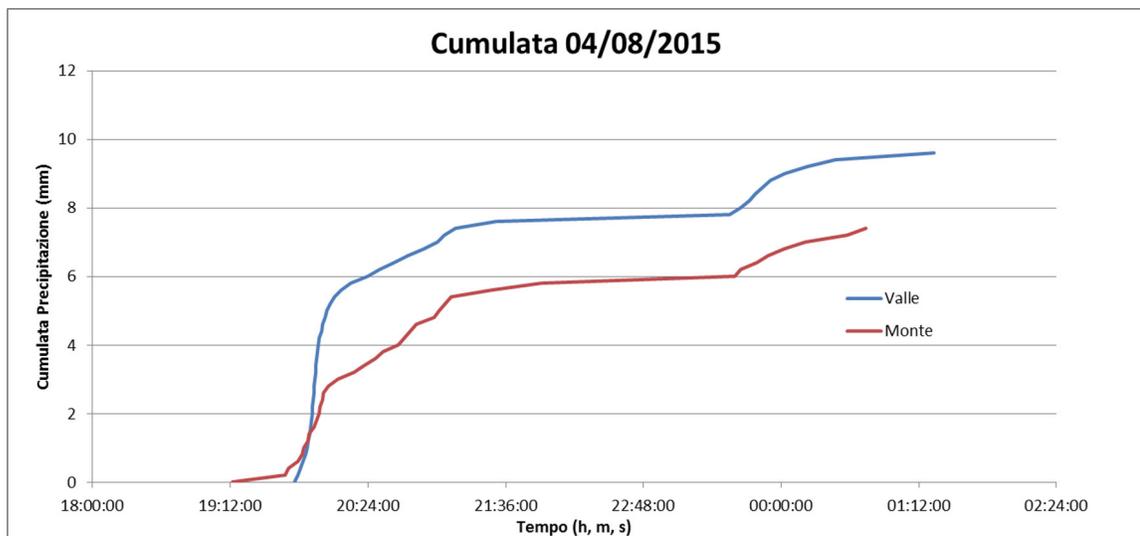


Figura 4.31: Precipitazione cumulata dell'evento del 4 agosto 2015.

Massimi di Precipitazione Oraria 4 Agosto 2015				
Pluviometro di Monte				
Intervallo di Tempo (min)	1	2	5	10
Ora del Massimo	19:50:32	19:50:32	19:58:24	19:57:21
Intensità Max (mm/h)	12	12	9,6	8,4
Pluviometro di Valle				
Intervallo di Tempo (min)	1	2	5	10
Ora del Massimo	19:55:29	19:55:29	19:54:43	19:53:28
Intensità Max (mm/h)	36	36	33,6	22,8

Tabella 4.2: Intensità massima di precipitazione oraria su periodi di 1 min., 2 min., 5 min., 10 min. dell'evento di pioggia del 4 agosto 2015.

In tutti gli eventi di precipitazione successivi, all'interno del limitato periodo considerato, non si è verificato ruscellamento superficiale anche se (Tabella 4.3) alcuni eventi sono stati di maggiore intensità e durata.

	4 agosto		15 agosto (1)		15 agosto (2)		16 agosto		17 agosto	
	P. Monte	P. Valle	P. Monte	P. Valle	P. Monte	P. Valle	P. Monte	P. Valle	P. Monte	P. Valle
h [mm]	9,6	7,4	14,6	19	9,6	9,2	11,2	11	6,2	3,6
Ora Inizio	19:45	19:13	01:20	00:27	21:30	21:23	14:48	14:29	23:53	23:40
Ora Fine	00:28	00:44	04:19	04:13	00:43	00:44	19:30	19:36	10:51	05:49
Durata	4 h 43 min	5 h 31 min	2 h 59 min	3 h 46 min	3 h 13 min	3 h 21 min	4 h 42 min	5 h 7 min	10 h 58 min	6 h 9 min
Scorrimento	SI		NO		NO		NO		NO	

Tabella 4.3: Tabella che rappresenta i millimetri di precipitazione caduti durante gli eventi verificatisi il 4 Agosto, il 15 agosto, il 16 agosto ed il 17 agosto 2015 rapportati alla durata dell'evento ed alla presenza di ruscellamento superficiale.

4.7 Conclusioni

Il monitoraggio del sito di Acquabona nell'anno 2015 ha presentato varie difficoltà di origine ambientale, strumentale e burocratica.

La condizione di quasi totale riempimento del canale nella zona della stazione di valle ha suggerito di modificare l'uso della stessa cercando di minimizzare gli eventuali danneggiamenti provocati dalla probabile esondazione, in quella zona, degli eventi di colata.

La stazione di valle è stata attrezzata con videocamera ed illuminatore notturno e, a partire da luglio, è stato ripristinato il sito internet mettendo a disposizione una

password di accesso all'Ufficio Tecnico del Comune di Cortina, che l'aveva richiesta per ragioni di protezione civile. Contemporaneamente sono stati distribuiti sul bacino tre pluviometri a basculante stand-alone per la misurazione delle precipitazioni a valle, a mezza quota e presso la stazione di monte.

Nell'anno in questione, gli eventi di colata nell'area di Acquabona si sono concentrati sul versante adiacente verso l'abitato di San Vito, dove si sono verificati più volte eventi che hanno raggiunto la strada Alemagna, inibendo la circolazione stradale per varie giornate.

Eventi di minore intensità si sono verificati anche all'interno del rio di Acquabona. In particolare è stato possibile descrivere vari dettagli dell'evento notturno dell'8 agosto, combinando le informazioni derivate dalla videocamera e dai pluviometri.

È stata osservata la caratteristica propagazione ad impulsi, ad intervalli di circa 3 minuti l'uno dall'altro, in media, e la complessità reologica all'interno della stessa colata, con flussi che possono essere definiti di colata granulo-inerziale matura, di flussi iperconcentrati e di flussi liquidi costituiti da una miscela concentrata di acqua e materiale fine d'alveo.

È apparsa evidente la successione alternata dei processi di erosione e di deposito che si verificano all'interno di un evento di colata e la tendenza alla formazione di argini laterali che modificano le condizioni del flusso all'interno dell'alveo.

È apparsa chiara la tendenza a concentrare i clasti di grandi dimensioni sul fronte e ai bordi laterali della colata in avanzamento.

E' stato osservato un ritardo di circa ottanta minuti tra l'inizio dello scorrimento superficiale alla stazione di valle e l'avvento del primo impulso di colata, intervallo che permetterebbe, se caratteristico del sito, un efficace intervento in termini di protezione civile.

La cumulata delle precipitazioni presso il pluviometro di valle e presso il pluviometro di monte presenta piccole differenze, mentre la forma dello ietogramma appare significativamente diversa.

Capitolo 5

Attività sperimentale

5.1 Introduzione

Lo scopo del lavoro di laboratorio è consistito nella realizzazione e nell'analisi, a scala di laboratorio, di movimenti di ammassi granulari secchi in diverse condizioni sperimentali. Sono stati utilizzati materiali granulari di diversa origine e dalle diverse caratteristiche fisiche. Sono stati generati scorrimenti su pendio libero e incanalato e in presenza e assenza di elementi di rallentamento e deviazione. Gli scorrimenti sono stati analizzati con tecniche fotogrammetriche che hanno permesso la rigenerazione tridimensionale, nel tempo, dell'evoluzione del volume occupato dall'ammasso granulare in movimento. Gli esperimenti, oltre a fornire informazioni reologiche sulla dinamica del moto ed elementi utili alla comprensione dei fenomeni reali in assenza di fluido intergranulare (per esempio valanghe di neve densa primaverile e valanghe di roccia) e in presenza di fluido intergranulare (colate di detriti) possono costituire dati di taratura per la modellazione fisico-matematica e numerica dei fenomeni richiamati.

5.2 L'apparato sperimentale

5.2.1 La canaletta

La superficie di supporto degli esperimenti è costituita da una canaletta composta da due piani inclinati di forma quadrata con lato di lunghezza 1,5 m (Figura 5.1), incernierati su un lato e posti a pendenza diversa. Le prove di laboratorio sono state realizzate con il piano di monte inclinato di circa $27,75 \pm 0,25^\circ$ ed il piano di valle di $6,5 \pm 0,1^\circ$ (Figura 5.2 e Figura 5.3).

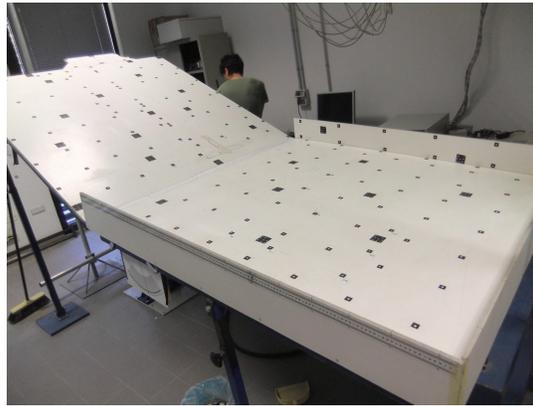


Figura 5.1: La canaletta, costituita da due piani inclinati, utilizzata per le prove.

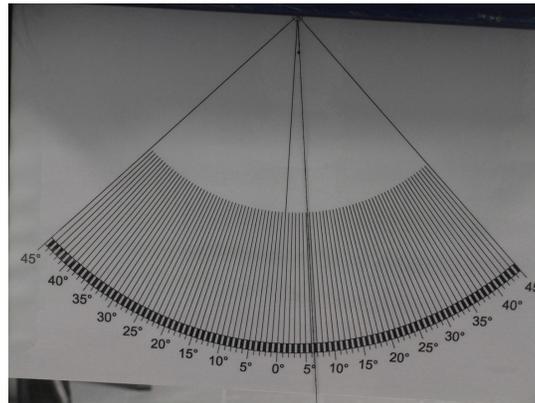
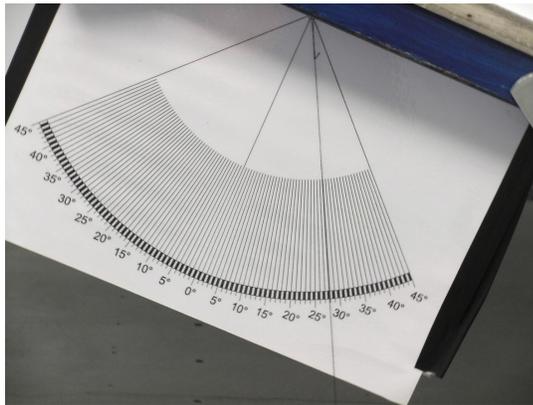


Figura 5.2: I clisimetri per la determinazione della pendenza del piano di monte e di valle collocati in destra orografica della canaletta sperimentale.

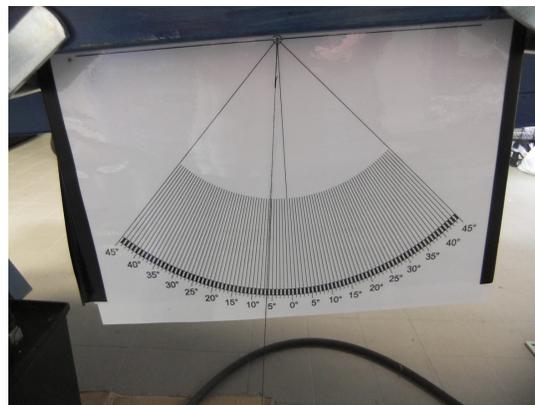
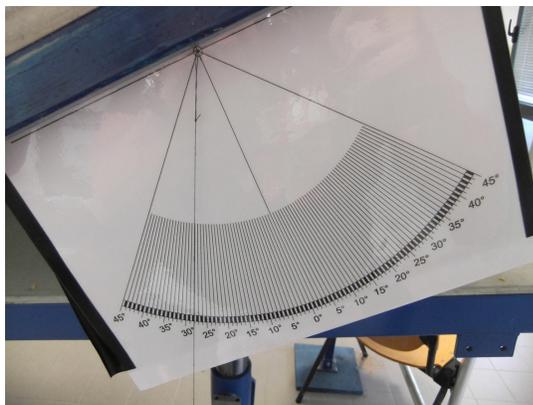


Figura 5.3: I clisimetri per la determinazione della pendenza del piano di monte e di valle collocati in sinistra orografica della canaletta sperimentale.

5.2.2 Le videocamere per l'analisi fotogrammetrica

Le prove vengono registrate da un sistema di otto videocamere di marca Basler Ace GigE da 2 Mpx in bianco e nero, che rilevano immagini ad una frequenza massima di 20 Hz o fps (frames per second), montate su una struttura di tubi in alluminio (Figura 5.4). Di queste videocamere quattro hanno distanza focale nominale 8 mm, due hanno distanza focale 6 mm e due hanno distanza focale 12 mm.

Nelle prove sperimentali il tempo di esposizione è stato posto a 300 μ s e il diaframma è stato mantenuto completamente aperto. Una sufficiente intensità luminosa, anche ai bassi tempi di esposizione adottati, è stata garantita da due illuminatori con frequenza di emissione di 48 kHz e potenza pari a 500 Watt ciascuno (Figura 5.4).

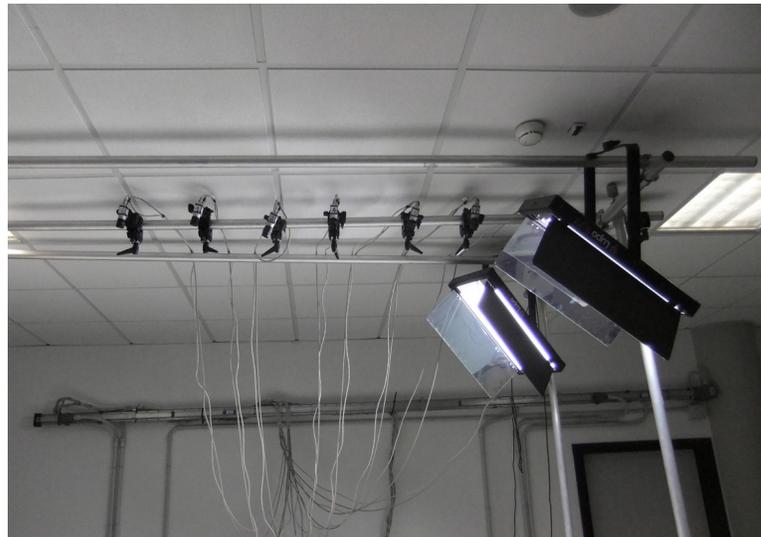


Figura 5.4: Assetto delle videocamere e degli illuminatori.

5.2.3 Il sistema di acquisizione

Le videocamere sono controllate da un programma appositamente scritto in Labview [5], che consente l'azionamento contemporaneo di tutte le otto videocamere mediante un trigger esterno (Figura 5.5) ad una frequenza massima di 20 Hz. Le immagini vengono salvate in formato Ascii e trasformate successivamente in formato Jpeg, Tiff o Bitmap. Mediante un software NI è stato possibile fissare il tempo di otturazione delle singole videocamere, mentre l'apertura del diaframma è stata impostata manualmente. La memorizzazione dei fotogrammi provenienti dalle otto videocamere è stata effettuata con la tecnica Raid 0 di raggruppamento di otto dischi fissi.



Figura 5.5: Trigger esterno che, assieme al software Labview, garantisce la contemporaneità degli scatti delle videocamere.

5.2.4 I materiali utilizzati

Nelle prove sperimentali sono stati utilizzati tre materiali diversi così identificati: ghiaia grossa, ghiaia fine e zeoliti sintetici (Figura 5.6).

La ghiaia grossa è formata da elementi subangolari di rocce di varia origine costituenti, nel complesso, una ghiaia con un diametro medio di 1,2 cm e un fattore di forma pari a circa 0,7. Alcuni degli elementi sono stati precedentemente tracciati con dei punti bianchi sulle facce principali in modo da migliorare la restituzione fotogrammetrica [5]. La densità di questo materiale è pari a 2569 kg/m³.

La ghiaia fine, anch'essa formata da elementi subangolari di rocce di varia origine, è costituita da elementi aventi un diametro medio di circa 0,5 cm e un fattore di forma tra lo 0,6 e lo 0,7. La densità di questo materiale risulta molto simile a quella del precedente e pari a 2598 kg/m³.

Il materiale costituito da zeolite sintetica (minerali di silicio-alluminio idrati artificiali), ha elementi di forma sferica e diametro variabile tra 0,2 mm e 2 mm. La sua densità è pari a 1080 kg/m³. All'interno di questo materiale sono stati introdotti degli elementi sferici in PVC di colore bianco del diametro di 2 mm, con l'obiettivo, ancora una volta, di migliorare la restituzione fotogrammetrica. La densità di questo materiale è pari a 1300 kg/m³.

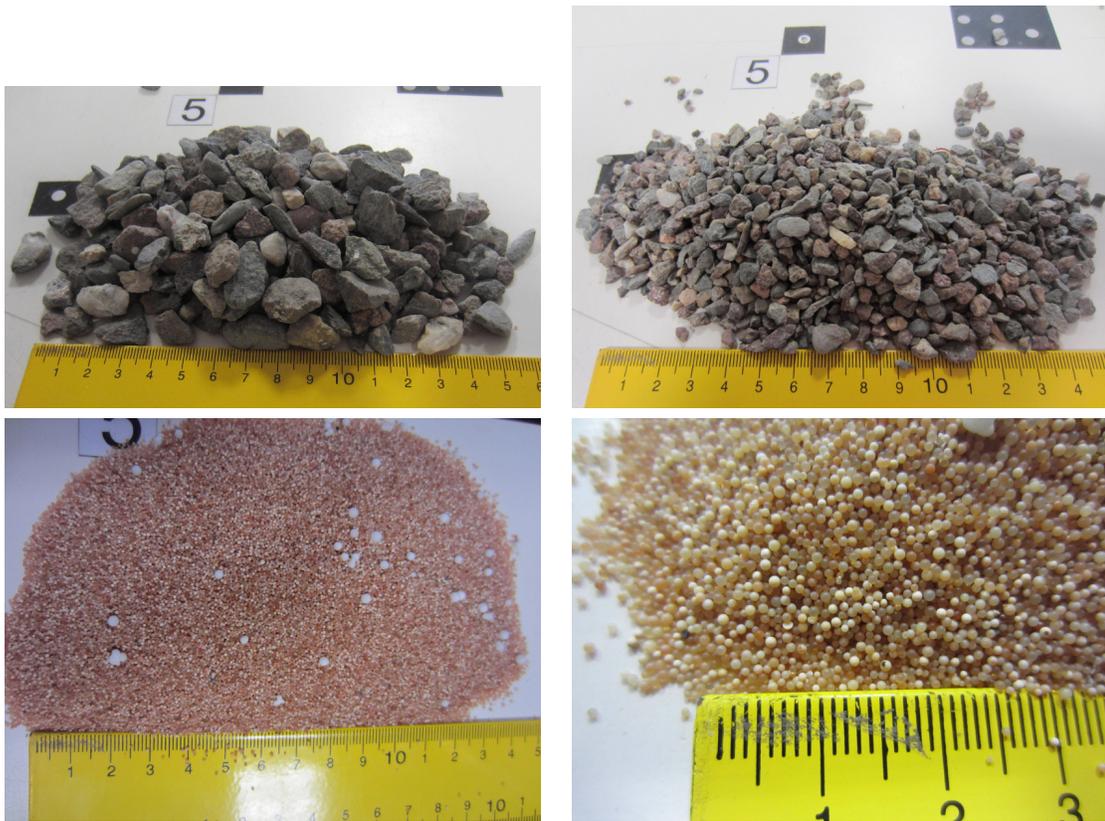


Figura 5.6: I materiali utilizzati per le prove. In alto a sinistra la ghiaia grossa, in alto a destra la ghiaia fine, in basso a sinistra le zeoliti, in basso a destra un dettaglio delle zeoliti.

5.2.5 I target codificati

Sui due piani di supporto sono stati posizionati dei target codificati (utilizzati in accoppiamento con il software Australis) e dei target a punto singolo per poter effettuare le indagini fotogrammetriche con le videocamere (Figura 5.7). Sono stati utilizzati due software: il software Australis è stato utilizzato per la taratura delle ottiche delle videocamere e per la restituzione dei due piani inclinati; il software Agisoft Photoscan è stato utilizzato per la generazione tridimensionale del materiale in movimento.

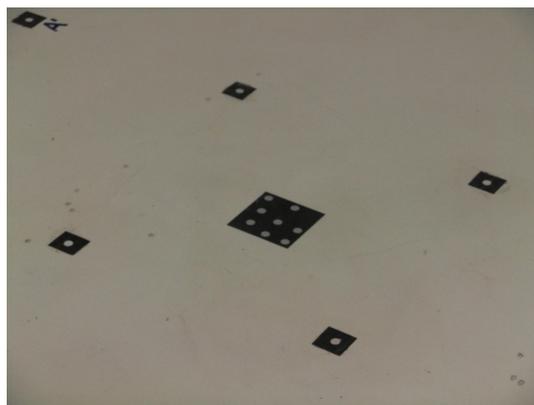


Figura 5.7: Target codificati e target a punto singolo retro-riflettenti utilizzati per la restituzione fotogrammetrica. Il diametro del punto bianco è 6 mm.

5.3 Caratterizzazione dei materiali

Per la caratterizzazione del materiale sono state eseguite prove di densità, prove di compattazione con determinazione della porosità e prove di attrito del materiale sul fondo.

5.3.1 Prove di densità

Nelle prove per la determinazione della densità della ghiaia, in un cilindro graduato sono stati inseriti 500 ml di acqua e, a seguire, il materiale granulare fino alle condizioni di saturazione. La determinazione dei volumi e dei pesi delle varie componenti ha permesso di stimare la densità della ghiaia grossa (2569 kg/m^3) e della ghiaia fine (2598 kg/m^3). Poi il sedimento è stato messo in degli scatoloni ad essiccare. La densità del materiale zeolite sintetica è stata ottenuta da letteratura e vale 1080 kg/m^3 .

5.3.2 Prove di compattazione

Per la stima della compattazione è stato utilizzato un cilindro graduato da 1000 ml. Dopo aver pesato il contenitore ed il materiale, quest'ultimo è stato introdotto nel cilindro con modalità simili a quelle utilizzate nelle prove in canaletta per il caricamento iniziale del materiale granulare. Sono state realizzate più ripetizioni della stessa prova (Figura 5.8) ottenendo per la ghiaia grossa una porosità iniziale di 0,5 ed una compattazione massima del 15% circa, per la ghiaia fine una porosità iniziale ancora pari a circa 0,5 ed una compattazione massima del 12,5%, per gli zeoliti una porosità iniziale del 0,2 ed una compattazione massima di circa il 5,1%.



Figura 5.8: A sinistra, la ghiaia fine disposta nel cilindro in condizioni definite di massima porosità; a destra, la stessa massa in condizioni di massimo compattamento a seguito di vibrazione manuale applicata al cilindro.

5.3.3 Prove d'attrito sul fondo tra materiale e superficie della canaletta

Le prove d'attrito sono state realizzate con lo scopo di stimare l'angolo d'attrito tra i materiali granulari ed il fondo della canaletta sperimentale. È stata utilizzata una scatola di taglio realizzata presso il Laboratorio di Idrogeologia (Figura 5.9). Per ogni materiale sono state eseguite quattro prove variando il peso di materiale interno alla scatola.

Le prove sono state eseguite aumentando progressivamente il peso nel secchio di Figura 5.9, con modalità quasi statiche, versando del materiale granulare, fino a provocare il movimento della scatola. Per ogni prova sono state fatte diverse ripetute.

I dati ottenuti sono stati elaborati nell'ipotesi che il comportamento reologico del

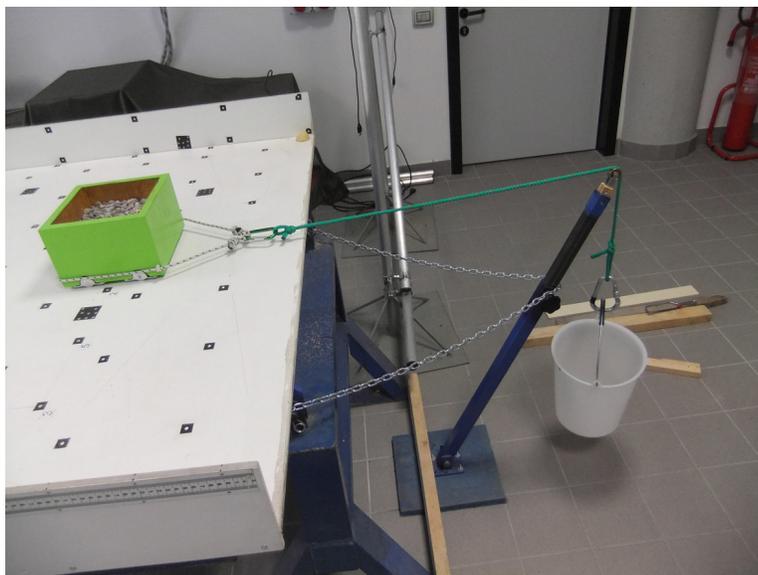


Figura 5.9: Visione d'insieme della scatola di taglio e del sistema di trasmissione della forza orizzontale applicata.

materiale sia di tipo Coulombiano e sono rappresentati in Figura 5.10, Figura 5.11 e Figura 5.12.

5.4 Elementi di fotogrammetria

Si definisce come fotogrammetria [7] quell'insieme di tecniche che consentono di ricostruire le proprietà metriche di un'oggetto a partire da un certo numero di foto dello stesso dopo aver impostato un sistema di riferimento opportuno.

La fotogrammetria può essere aerea, satellitare o terrestre. Nel nostro caso particolare si utilizzerà principalmente la fotogrammetria terrestre. Solitamente rilevare un oggetto significa trovare la posizione nello spazio di tutti i punti di interesse, anche agendo direttamente sull'oggetto. La fotogrammetria, invece, permette di operare quasi esclusivamente sulle singole fotografie.

La fotografia è assimilabile ad una proiezione ottica centrale. Tutti i raggi provenienti dal mondo esterno vengono convogliati attraverso le lenti dell'obiettivo in un'area assimilabile ad un punto, e proiettati su uno schermo che li intercetta detto pellicola o CCD per le macchine fotografiche digitali. La fotografia quindi è, con buona approssimazione, una vista prospettica della realtà. Tuttavia solo dopo lo sviluppo delle conoscenze nella geometria descrittiva e nella fotografia la fotogrammetria ha potuto svilupparsi in tutta la sua forza.

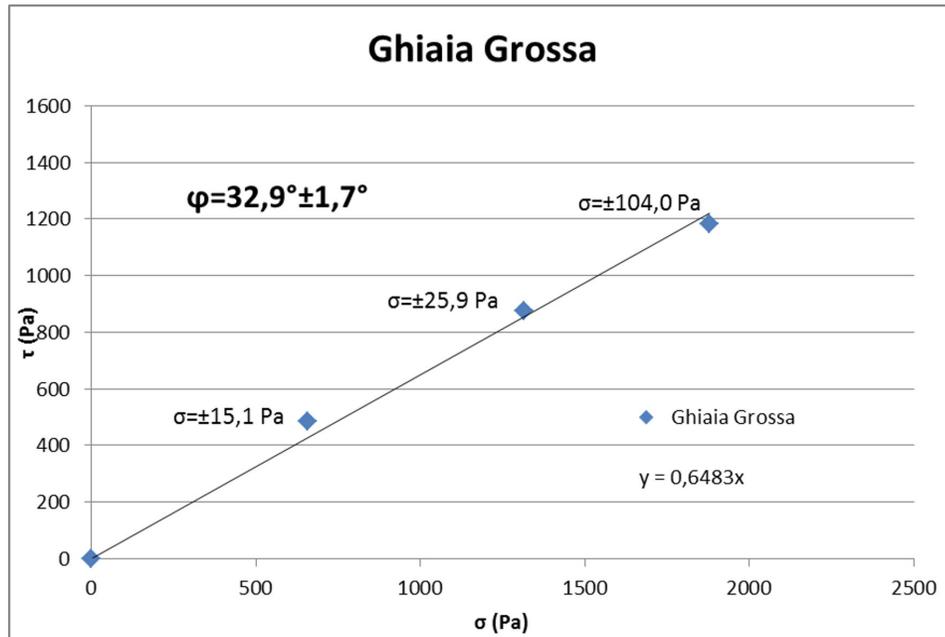


Figura 5.10: Grafico che riporta i risultati delle prove di attrito sul fondo per la ghiaia grossa con relativo errore associato ad ogni punto ed al valore dell'angolo d'attrito.

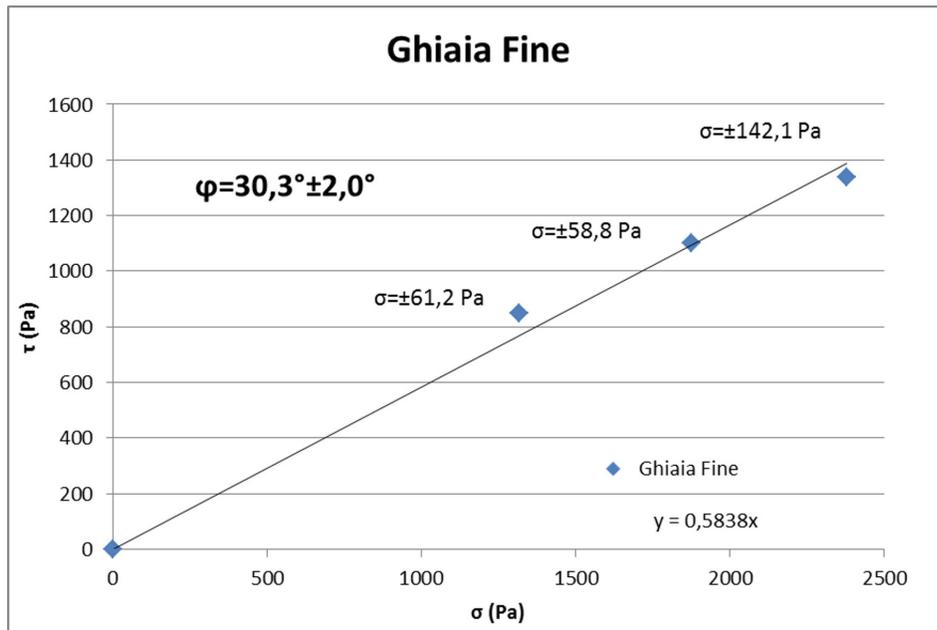


Figura 5.11: Grafico che riporta i risultati delle prove di attrito sul fondo per la ghiaia fine con relativo errore associato ad ogni punto ed al valore dell'angolo d'attrito.

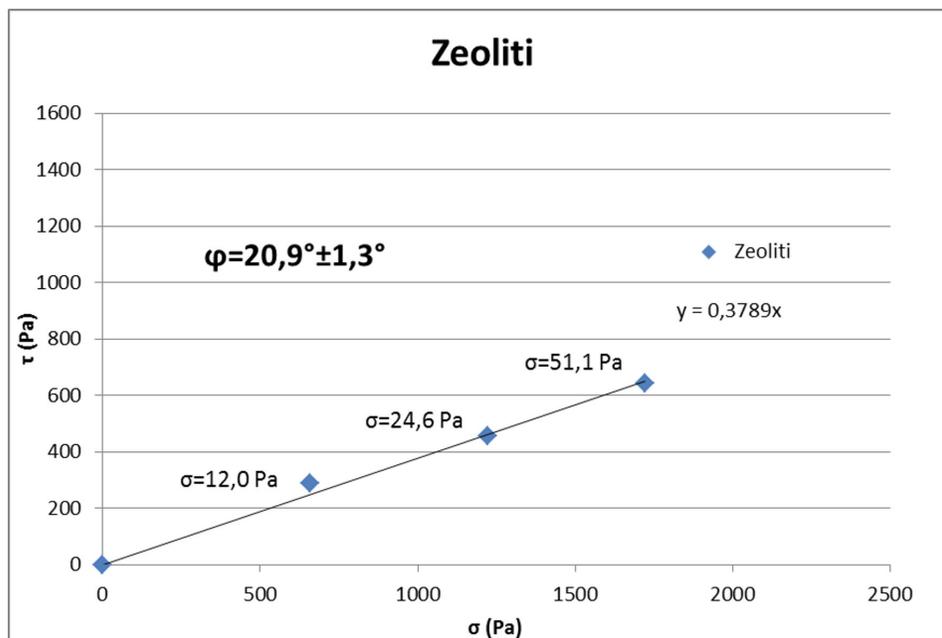


Figura 5.12: Grafico che riporta i risultati delle prove di attrito sul fondo per le zeoliti con relativo errore associato ad ogni punto ed al valore dell'angolo d'attrito.

Nell'era digitale la pellicola delle macchine fotografiche è stata sostituita dai più moderni sensori CCD (Figura 5.13). Questi sono composti da un elevatissimo numero di minuscoli elementi sensibili alla luce. Quando la luce colpisce uno degli elementi viene registrata una differenza di energia potenziale proporzionale all'intensità della luce incidente. La differenza di potenziale viene trasformata in un segnale che viene misurato, convertito in numero e memorizzato. L'intensità luminosa viene divisa in livelli a seconda della risoluzione del convertitore di segnale. Gli elementi della CCD, però, non sono in grado di distinguere i differenti colori della luce, per questo vengono anteposti al sensore dei filtri RGB. Ogni immagine digitale è quindi composta da un elevatissimo numero di piccolissimi elementi quadrati (o rettangolari), il cui insieme va a formare l'immagine.

Lo studio del comportamento della luce quando questa incontra una superficie di separazione tra due materiali con densità differente viene chiamato ottica geometrica. Ogni volta che ciò accade i raggi di luce subiscono in parte delle riflessioni, in parte penetrano nel secondo materiale e subiscono delle rifrazioni che sono funzione della densità del secondo materiale.

Le ottiche delle macchine fotografiche e delle videocamere, costituite da un insieme di lenti, hanno il compito di modificare opportunamente il percorso dei raggi luminosi provenienti dall'oggetto fotografato. Per lente (Figura 5.14) si intende generalmente un

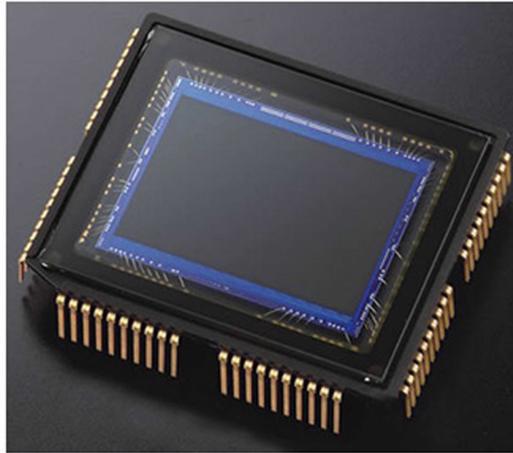


Figura 5.13: Esempio di CCD a 10,2 Megapixel.

solido di materiale trasparente alla luce, e delimitato da facce di forma sferica in grado di deviare il cammino dei raggi luminosi che lo raggiungono. Esistono lenti positive o convergenti e anche negative o divergenti. Parlando di lenti convergenti, la forma circolare della lente garantisce un angolo di rifrazione costante e contemporaneamente la focalizzazione dei raggi luminosi su un solo piano.

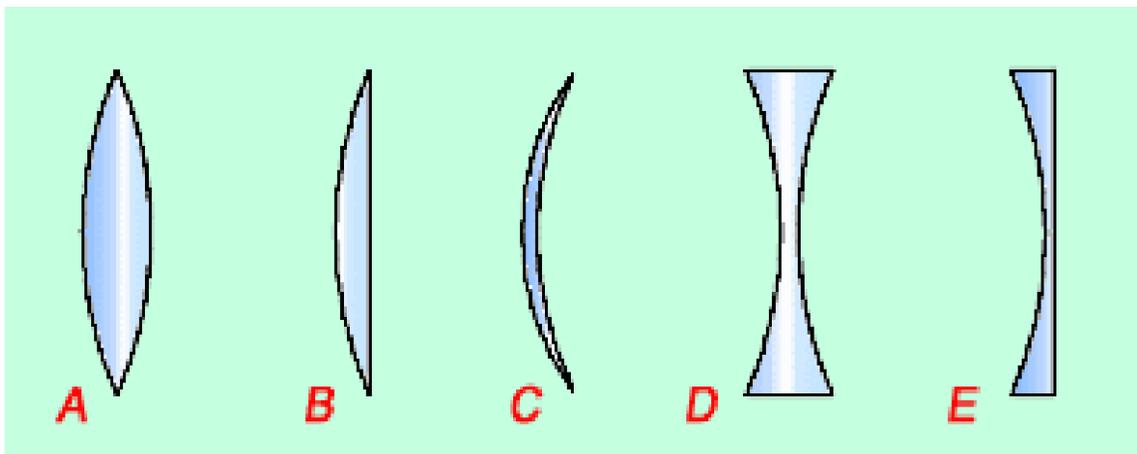


Figura 5.14: Caratteristiche geometriche delle lenti.

Quando la luce attraversa una lente attraversa due superfici che dividono tre mezzi con indice di rifrazione diverso: aria, vetro ed aria. Ogni volta che una superficie viene attraversata l'indice di rifrazione cambia e il raggio di luce viene rifratto. L'indice di rifrazione si definisce come il rapporto tra il seno dell'angolo di incidenza e quello dell'angolo rifratto (Eq. 5.1).

$$\frac{\text{sen}\theta_1}{\text{sen}\theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \quad (5.1)$$

Con θ_1 angolo di incidenza rispetto alla normale al piano, θ_2 angolo di rifrazione rispetto alla normale al piano, n_1 ed n_2 coefficienti di rifrazione dei mezzi interessati. Il rapporto dei coefficienti di rifrazione da l'indice di rifrazione.

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

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

La formula delle lenti o Legge di Gauss lega la distanza dell'oggetto dalla lente con la distanza dell'immagine e la focale (Eq. 5.2). Indicando con D la distanza dell'oggetto dalla lente, con d la distanza dell'immagine dalla lente e con f la distanza focale si ha:

$$\frac{1}{D} + \frac{1}{d} = \frac{1}{f} \quad (5.2)$$

La Eq. 5.2 permette di conoscere a quale distanza dal fuoco e dalla lente si forma l'immagine.

Se la lente fosse una lastra a facce piane e parallele il raggio incidente, nonostante la rifrazione all'interno del mezzo intermedio, riemergerà con lo stesso angolo di incidenza. (Figura 5.15).

L'obiettivo fotogrammetrico è sempre costituito da un insieme di lenti, accostate o distanziate tra loro, tali da annullare le aberrazioni e le distorsioni delle immagini.

Se consideriamo tutti i fasci di raggi uscenti da diversi punti del terreno, si vedrà che essi convergono tutti in un punto N_1 dell'asse ottico dell'obiettivo, che è il primo punto nodale, posto in corrispondenza dell'intersezione fra l'asse ottico ed il piano principale di entrata della lente, e fuoriescono parallelamente da un secondo punto N_2 dello stesso asse, detto secondo punto nodale, in corrispondenza dell'uscita. Questo perchè in prima approssimazione una lente può essere considerata piana. In corrispondenza del secondo punto nodale i fasci si dividono nuovamente e danno origine all'immagine sul piano della CCD. Se un oggetto fosse posto a distanza infinita, sarebbe necessario che il piano focale e quello della CCD coincidessero. È lecito quindi considerare l'esistenza dei due punti nodali (Figura 5.16).

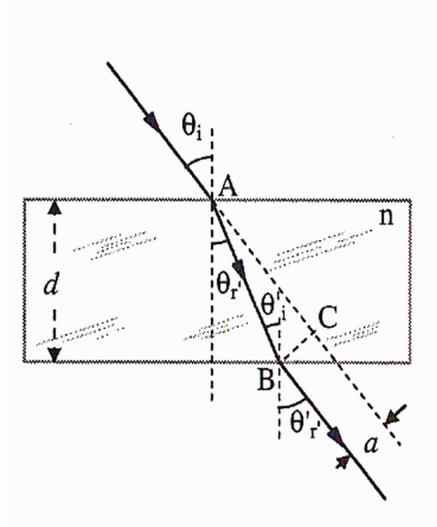


Figura 5.15: Rifrazione del raggio luminoso.

Per distanza principale si intende quindi la distanza N_2P , del secondo punto nodale dal piano del fotogramma.

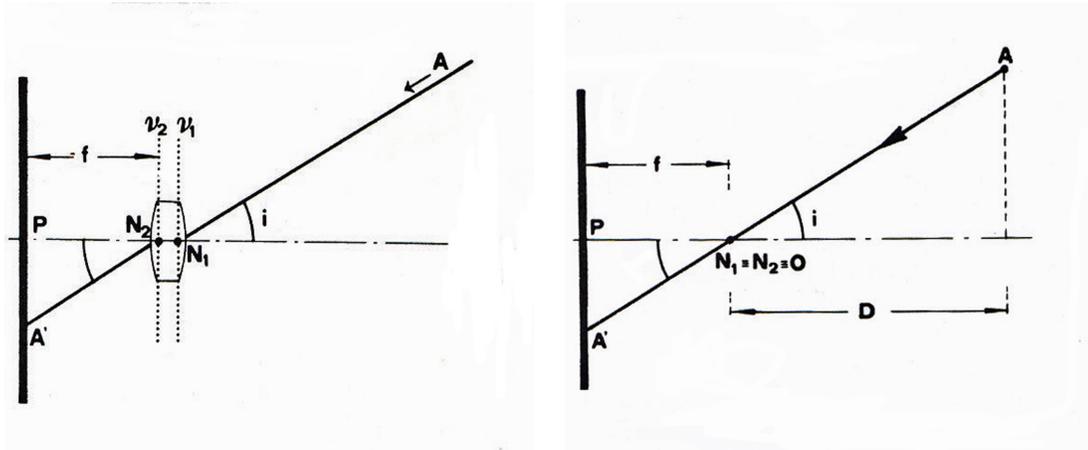


Figura 5.16: Schema di formazione dell'immagine per una lente rappresentata dai suoi punti nodali.

Allo schema teorico dei piani principali (o nodali), corrisponde nella realtà una successione di mezzi ottici diversi separati da superfici curve. Dopo l'assemblaggio di tutte le singole lenti e il montaggio dell'obiettivo sulla macchina fotografica si saranno inevitabilmente accumulati piccoli errori che causano una distorsione residua dell'immagine.

Il telaio della camera fotogrammetrica porta sempre dei segni fiduciali in posizione fissa. Il centro degli assi realizzabili congiungendo le marche a due per volta, gen-

eralmente non coincide per piccolissime quantità con il punto di autocollimazione A (Figura 5.17). Il punto di autocollimazione è il punto reale in cui l'asse ottico reale distorto interseca il piano dell'immagine. Le coordinate di quest'ultimo rispetto al sistema di assi del fotogramma si indicano con x_0, y_0 , e vengono riportate nel certificato di calibrazione della macchina.

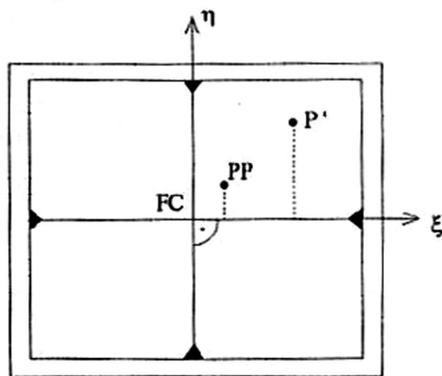


Figura 5.17: Deviazione del centro dell'asse ottico dalla congiungente delle marche fiduciali, sul piano dell'immagine.

Alle grandezze c, x_0, y_0 , si dà il nome di parametri di orientamento interno della prospettiva, inoltre c è definita come costante della macchina che rappresenta la distanza principale e Δ è la distorsione residua. Va però aggiunta ad essi la funzione di distorsione secondo l'Eq. 5.3:

$$r_i = c \tan \alpha + \Delta \quad (5.3)$$

La distanza focale c varia a seconda della distanza a cui è posto l'oggetto e per questo la maggior parte delle fotocamere per uso fotogrammetrico operano a fuoco fisso adattate per l'infinito o comunque oltre la distanza iperfocale, distanza oltre la quale tutti gli oggetti si possono praticamente ritenere a fuoco [8].

L'imperfezione associata alla costruzione degli obiettivi genera l'effetto di distorsione più importante dal punto di vista della fotogrammetria, dato che influisce sulla geometria dell'immagine stessa e quindi sulle misure da eseguire. La distorsione produce uno spostamento dell'immagine, rispetto alla posizione che tale immagine avrebbe assunto se l'obiettivo fosse stato perfettamente corretto. Tale spostamento ha una componente radiale, Δr , ed una tangenziale, Δt (Figura 5.18). Nelle normali applicazioni

fotogrammetriche, viene generalmente presa in considerazione la sola componente nella direzione radiale.

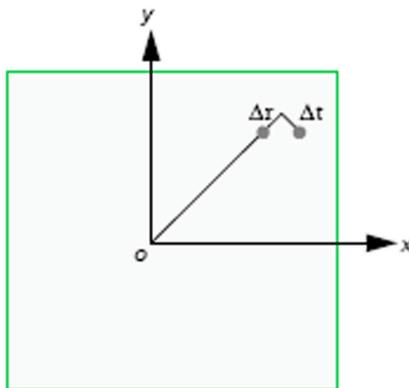


Figura 5.18: Distorsione radiale e tangenziale delle lenti.

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

L'effetto della distorsione radiale attraverso un'immagine può essere approssimato mediante l'utilizzo di un polinomio [9] del tipo di Eq. 5.4, utilizzato per il calcolo dei coefficienti associati alla distorsione radiale delle lenti.

$$\Delta r = k_1 r + k_2 r^3 + k_3 r^5 \quad (5.4)$$

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

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

5.4.1 Orientamento esterno

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

coordinate nello spazio oggetto X, Y, Z rispetto allo spazio immagine x, y, z . A questo proposito si definiscono, generalmente, 3 angoli di rotazione ω, φ, κ (Figura 5.19).

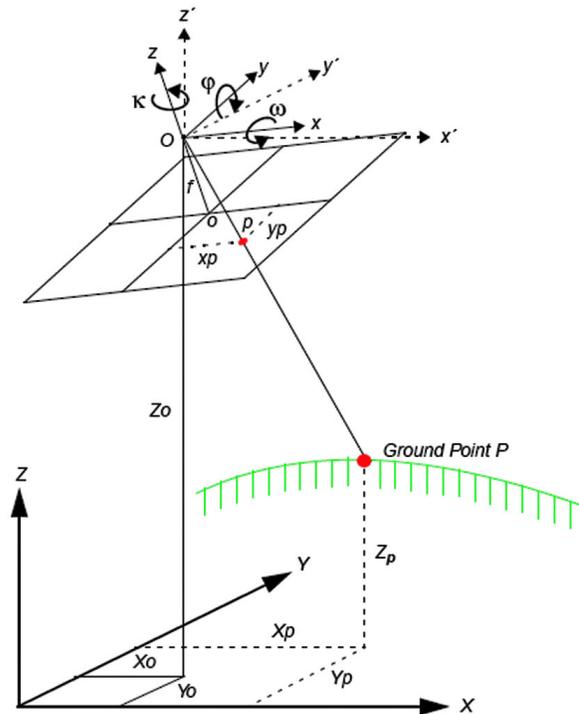


Figura 5.19: Definizione dei parametri di orientazione esterna.

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

5.4.2 Le equazioni di collinearità

Per rappresentare i raggi registrati dalla macchina fotografica si utilizza una soluzione analitica basata su un modello matematico. Questo modello assume che il raggio debba essere una linea retta che passa attraverso il punto immagine p , il centro di prospettiva O , e il ground point P . Le equazioni di collinearità sono così espresse (Eq. 5.5, Eq. 5.6):

$$x_p - x_0 = -f \left[\frac{m_{11}(X_p - X_0) + m_{12}(Y_p - Y_0) + m_{13}(Z_p - Z_0)}{m_{31}(X_p - X_0) + m_{32}(Y_p - Y_0) + m_{33}(Z_p - Z_0)} \right], \quad (5.5)$$

$$y_p - y_0 = -f \left[\frac{m_{21}(X_p - X_0) + m_{22}(Y_p - Y_0) + m_{23}(Z_p - Z_0)}{m_{31}(X_p - X_0) + m_{32}(Y_p - Y_0) + m_{33}(Z_p - Z_0)} \right], \quad (5.6)$$

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

Le equazioni di collinearità includono tutti i parametri di orientamento interno ed esterno richiesti per risolvere i problemi di allineamento. Le soluzioni analitiche consistono in sistemi di equazioni di collinearità che relazionano coordinate misurabili a parametri conosciuti e sconosciuti della fotogrammetria. Le equazioni sono risolte simultaneamente per determinare i parametri sconosciuti. Dato che, normalmente, sono disponibili misure in abbondanza che producono più equazioni rispetto alle incognite del problema, si usa un metodo ai minimi quadrati per stimare i parametri sconosciuti, inclusi gli errori nella stima delle coordinate [10].

5.5 Calibrazione delle videocamere

Il primo passo dell'attività di laboratorio è stato la calibrazione delle videocamere, eseguita utilizzando il software Australis [11]. La procedura di calibrazione prevede di riprendere un numero elevato di volte un oggetto contenente un numero opportuno di target (forniti con Australis). Circa il 30% dei fotogrammi deve essere ruotato di 90° rispetto alla posizione di "paesaggio", il network di immagini deve avere geometria fortemente convergente in entrambe le direzioni (70°-100°), l'immagine deve essere presa alla risoluzione e qualità massime. La videocamera non deve essere rifocalizzata durante l'intera sessione di ripresa, la funzione di zoom deve essere lasciata fissa al valore desiderato. La qualità della calibrazione delle ottiche dipende dal numero di target utilizzati, dal numero di immagini e della distanza fra macchina fotografica ed oggetto.

I valori dei parametri di calibrazione delle videocamere sono riportati in Tabella

5.1. Le immagini sono state ottenute sfruttando il software di acquisizione impostato alla frequenza di 2 Hz. I valori ottenuti sono prossimi ai valori nominali.

Risultati Calibrazione

n Camera	0	1	2	3	4	5	6	7
Focale Nominale (mm)	12	6	8	8	8	12	6	8
Focale Reale (mm)	12,8013	6,1847	8,3013	8,3281	8,2958	12,7335	6,1835	8,3303
x _p (mm)	-0,0285	-0,0339	-0,0237	-0,0883	-0,0462	0,0181	-0,1264	0,0874
y _p (mm)	0,1293	0,0908	0,0593	0,0366	0,0278	0,2015	0,0702	-0,0486
k ₁	6,20E-04	9,30E-03	1,47E-03	1,75E-03	1,57E-03	6,00E-04	9,24E-03	1,45E-03
k ₂	-1,67E-05	6,40E-05	-3,28E-05	-5,80E-05	-3,96E-05	-1,52E-05	8,34E-05	-3,36E-05
k ₃	3,65E-08	3,09E-06	-1,00E-06	-8,56E-08	-6,70E-07	-1,61E-08	2,11E-06	-8,98E-07
p ₁	-1,91E-05	-6,57E-05	4,00E-05	1,66E-04	-1,13E-04	5,92E-05	-9,15E-05	2,12E-04
p ₂	-1,29E-05	1,54E-04	1,69E-04	-1,99E-04	1,29E-04	9,19E-05	2,98E-05	-1,16E-04

Tabella 5.1: Risultati della calibrazione delle videocamere ottenuti mediante l'uso del software Australis.

Nel caso della macchina fotografica Canon Powershot Pro 1 sono stati ottenuti i valori riportati in Tabella 5.2.

Calibrazione Canon Powershot Pro1		
Focale Nominale (mm)	7,2	S. E.
Focale Reale (mm)	7,4631	0,002
x _p (mm)	-0,2087	0,003
y _p (mm)	0,0809	0,003
k ₁	2,98E-03	4,25E-05
k ₂	-1,19E-05	4,01E-06
k ₃	-1,33E-06	1,10E-03
p ₁	4,97E-04	1,28E-05
p ₂	-6,69E-05	1,24E-05

Tabella 5.2: Risultati della calibrazione della macchina fotografica Canon ottenuti mediante l'uso del software Australis.

Durante una prima serie di test di calibrazione delle videocamere sono stati ottenuti i risultati di Tabella 5.3, come si nota, molto distanti dai valori nominali. Ciononostante, la successiva generazione del DTM della canaletta aveva fornito risultati praticamente coincidenti a quelli ottenuti con i parametri corretti. Varie prove sono state concepite ed eseguite per spiegare una variazione così significativa rispetto ai valori nominali, senza ottenere risposte soddisfacenti. La verifica della lunghezza di

default del lato del pixel quadrato della CCD ha, infine, evidenziato come questa fosse impostata a 0,05 mm anziché 0,044 mm [5].

Calibrazione Errata								
n Camera	0	1	2	3	4	5	6	7
Focale Nominale (mm)	12	6	8	8	8	12	6	8
Focale Reale (mm)	14,547	7,0277	9,4321	9,4635	9,4263	14,4685	7,0321	9,4668
xp (mm)	-0,0322	-0,0326	-0,0279	-0,1002	-0,0524	0,0204	-0,1404	0,0996
yp (mm)	0,1468	0,1055	0,0697	0,0414	0,0315	0,2289	0,0739	-0,0552
k1	4,80E-04	7,20E-03	1,15E-03	1,36E-03	1,22E-03	4,65E-04	7,21E-03	1,12E-03
k2	-9,97E-06	3,90E-05	-2,03E-05	-3,48E-05	-2,38E-05	-9,18E-06	4,76E-05	-2,03E-05
k3	1,51E-08	1,41E-06	-4,41E-07	-3,79E-08	-3,09E-07	-5,22E-09	1,04E-06	-4,14E-07
p1	-1,68E-05	-6,04E-04	4,05E-05	1,46E-04	-1,01E-04	5,23E-05	-9,70E-05	1,86E-04
p2	-1,11E-05	1,32E-04	1,40E-04	-1,74E-04	1,14E-04	8,07E-05	-3,00E-05	-1,02E-04

Tabella 5.3: Risultati della calibrazione delle videocamere ottenuti mediante l'uso del software Australis e impostando a 0,05 mm (anziché 0,044 mm) la lunghezza del lato del pixel della CCD della telecamera.

Il risultato appare sorprendente, anche in considerazione della non linearità del sistema di equazioni fotogrammetrico.

5.6 Le prove di laboratorio - generalità

Le prove di laboratorio sono state divise in due parti, le prove a pendio aperto e le prove a pendio incanalato, senza e con deviatore di flusso. Per ogni prova è stata verificata la ripetibilità mediante l'esecuzione di una ulteriore test alle stesse condizioni sperimentali. In Tabella 5.4 vengono elencate le prove effettuate e il codice loro attribuito.

Un certo numero di prove preliminari sono state eseguite per verificare il corretto funzionamento del sistema e il corretto posizionamento delle videocamere.

5.7 Prove su pendio aperto

Nelle prove in canaletta sono stati utilizzati 12,5 kg di ghiaia grossa e di ghiaia fine e 7,5 kg di materiale zeolitico. Il materiale è stato collocato a caduta, da distanza ravvicinata, all'interno di un contenitore metallico di forma tronco-conica (Figura 5.20), con diametro inferiore $\bar{D}_{MAX} = 41,9$ cm, diametro superiore $\bar{d}_{min} = 21,9$ cm, e altezza $\bar{h} = 12,0$ cm. La posizione del contenitore tronco-conico è stata mantenuta costante

Prova	Codice	Ripetuta	Codice
Prove a pendio aperto	A	Ripetute a pendio aperto	Arip
Con ghiaia grossa	AGG	Con ghiaia grossa	AGGRip
Con ghiaia fine	AGF	Con ghiaia fine	AGFRip
Con zeoliti	AZ	Con zeoliti	AZRip
Prove a pendio incanalato	C	Ripetute a pendio incanalato	CRip
Semplici	CsD	Semplici	CsDRip
Con ghiaia grossa	CGGsD	Con ghiaia grossa	CGGsDRip
Con ghiaia fine	CGFsD	Con ghiaia fine	CGFsDRip
Con zeoliti	CZsD	Con zeoliti	CZsDRip
Con Deviatore	CcD	Con Deviatore	CcDRip
Con ghiaia grossa	CGGcD	Con ghiaia grossa	CGGcDRip
Con ghiaia fine	CGFcD	Con ghiaia fine	CGFcDRip
Con zeoliti	CZcD	Con zeoliti	CZcDRip

Tabella 5.4: Elenco delle prove e codici identificativi utilizzati.

in tutte le prove effettuate. Il rilascio del materiale nella canaletta veniva effettuato manualmente e in modo impulsivo.

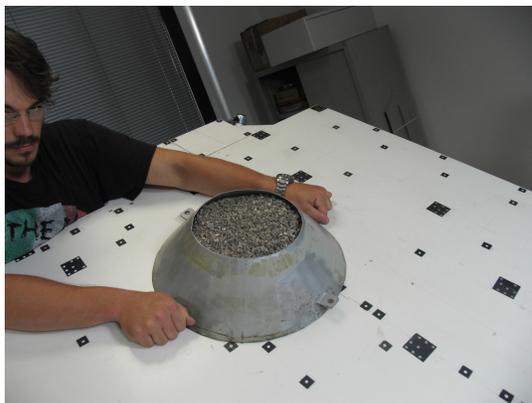


Figura 5.20: Il contenitore metallico di forma tronco-conica utilizzato nelle prove su pendio aperto e la posizione di rilascio sul piano di monte della canaletta.

In Figura 5.21, Figura 5.22 e Figura 5.23 sono riportate le immagini del deposito finale dei due test eseguiti per ogni materiale utilizzato a testimonianza della ripetibilità della procedura adottata.

5.7.1 Effetto della distribuzione granulometrica

Durante l'esecuzione delle prove preliminari è stato realizzato un test con ghiaia grossa nelle stesse condizioni al contorno dei test sopra presentati, con l'unica modifica dell'inserimento nel materiale granulare di una quantità trascurabile in peso di zeolite sintetica (dell'ordine dello 0.1%). In Figura 5.24 è mostrato il deposito finale. Si nota

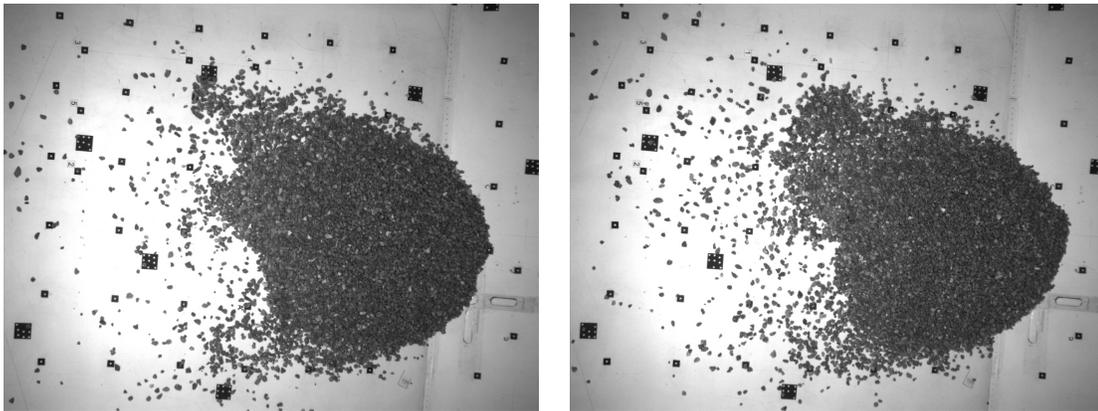


Figura 5.21: Deposito finale dell'ammasso granulare costituito da ghiaia grossa per la prima prova eseguita su pendio aperto, sulla sinistra, e per la sua ripetuta, sulla destra.

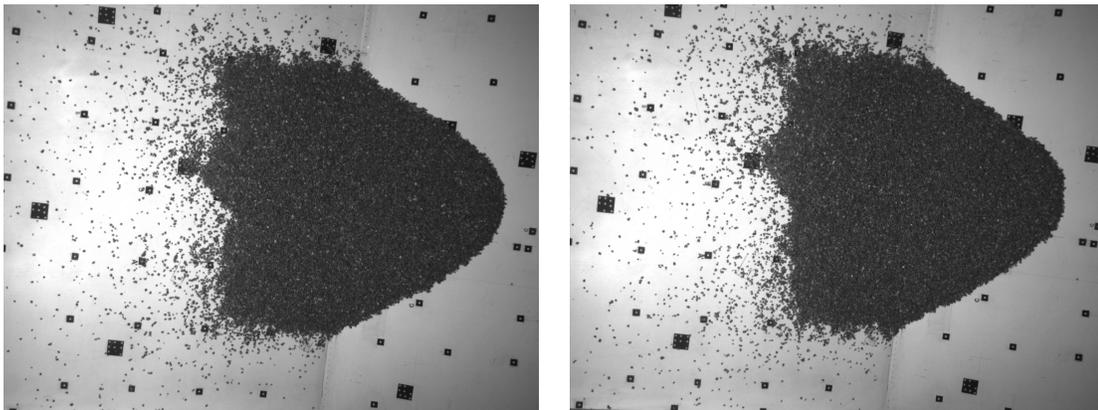


Figura 5.22: Deposito finale dell'ammasso granulare costituito da ghiaia fine per la prima prova eseguita su pendio aperto, sulla sinistra, e per la sua ripetuta, sulla destra.

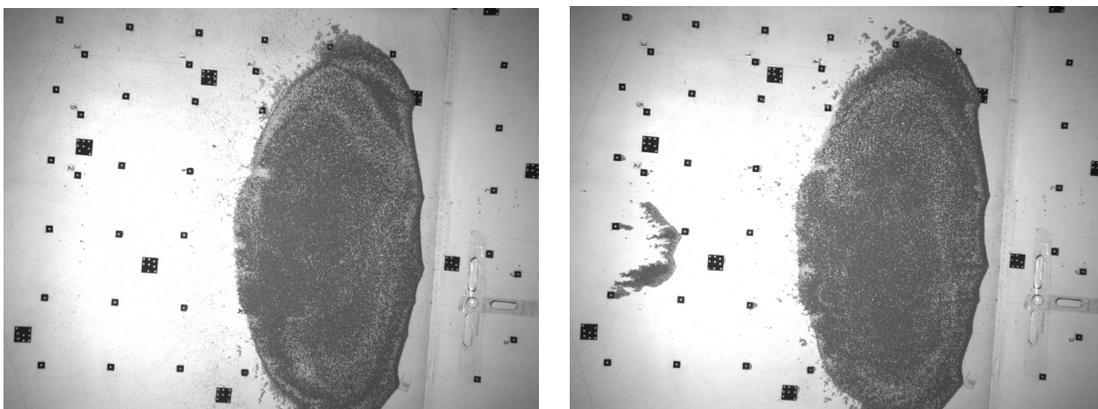


Figura 5.23: Deposito finale dell'ammasso granulare costituito da zeolite sintetica per la prima prova eseguita su pendio aperto, sulla sinistra, e per la sua ripetuta, sulla destra.

una distanza d'arresto molto maggiore rispetto alla prova in assenza della frazione fine e una forma del deposito notevolmente alterata sia rispetto al deposito con sola ghiaia grossa che rispetto al deposito con solo materiale zeolitico. La cosa è ben nota in letteratura [12] e fornisce una indicazione della delicatezza della fase di definizione dei valori dei parametri che rappresentano la reologia del materiale.

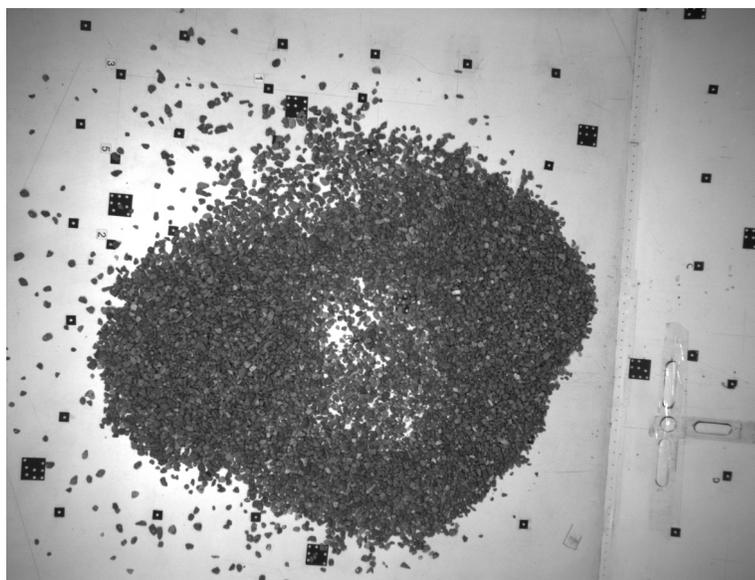


Figura 5.24: Prova con ghiaia grossa con una frazione in peso trascurabile di materiale zeolitico (dell'ordine dello 0,1 notevolmente rispetto al caso di assenza della zeolite (Figura 5.21)).

5.8 Prove su pendio incanalato

Le prove su pendio incanalato sono state realizzate nella configurazione sperimentale di Figura 5.25. Il canale di monte ha una larghezza di 20 cm. Le sponde hanno una altezza di 15 cm.

La stessa quantità di materiale utilizzato nelle prove su pendio aperto è stata disposta nella vasca di deposito iniziale raffigurata in Figura 5.26. Al sedimento, al fine della ripetibilità delle prove, è stata attribuita sempre la stessa forma. Il materiale granulare viene rilasciato nella canaletta attraverso il sollevamento impulsivo della paratoia di valle della vasca di carico.

In Figura 5.27, Figura 5.28 e Figura 5.29 sono riportate le immagini del deposito finale delle prove e delle loro ripetute per i tre materiali utilizzati.

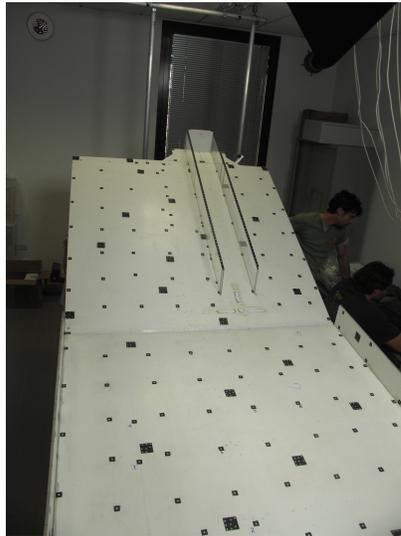


Figura 5.25: Il doppio piano inclinato con le sponde sul piano di monte.

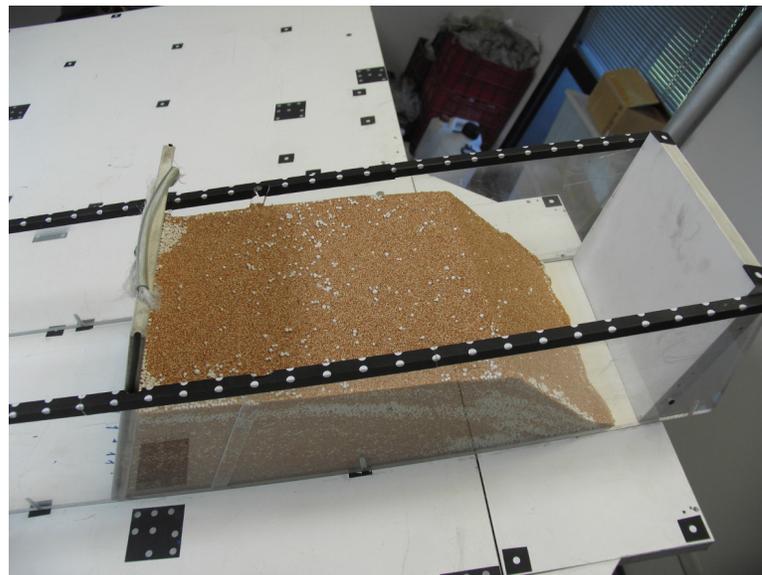


Figura 5.26: La vasca di carico nel caso delle prove su pendio incanalato e la disposizione assegnata al materiale granulare. Nell'immagine sono ben visibili i target fotogrammetrici sulle sponde laterali della canaletta applicati ai fini della restituzione fotogrammetrica.

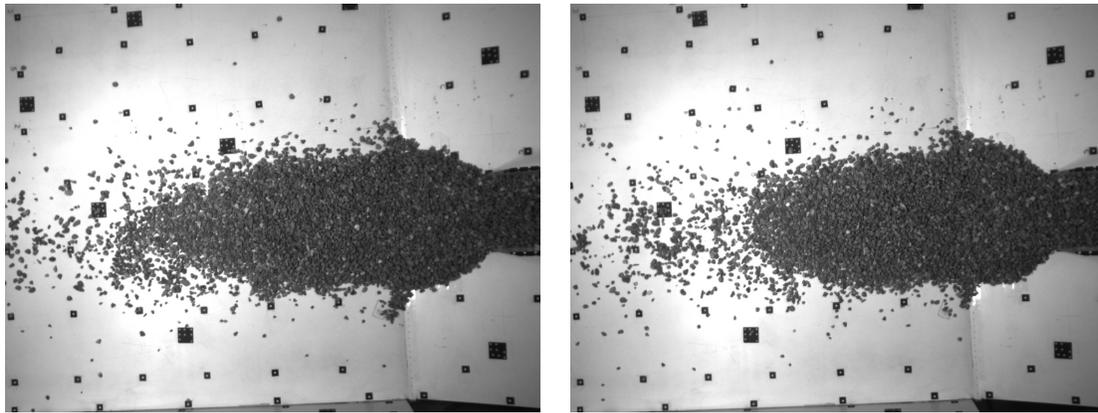


Figura 5.27: Deposito finale dell'ammasso granulare costituito da ghiaia grossa per la prima prova eseguita su pendio incanalato, sulla sinistra, e per la sua ripetuta, sulla destra.

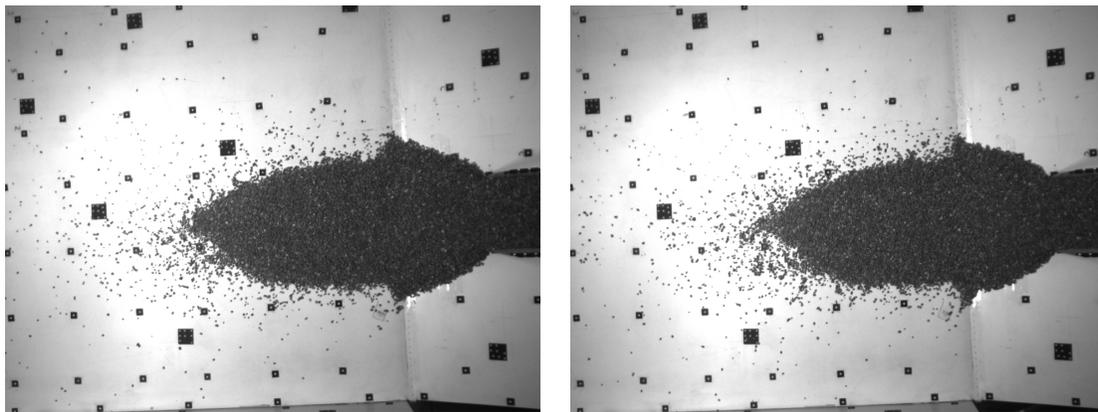


Figura 5.28: Deposito finale dell'ammasso granulare costituito da ghiaia fine per la prima prova eseguita su pendio incanalato, sulla sinistra, e per la sua ripetuta, sulla destra.

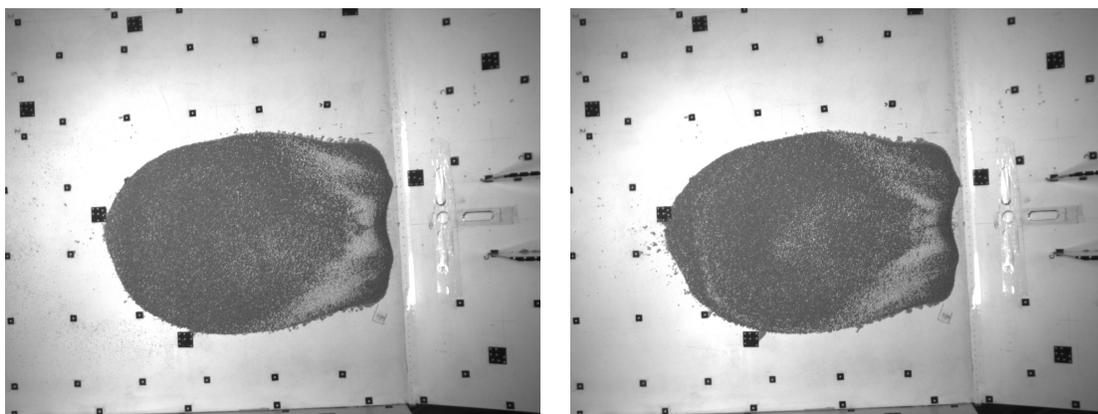


Figura 5.29: Deposito finale dell'ammasso granulare costituito da materiale granulare zeolitico per la prima prova eseguita su pendio incanalato, sulla sinistra, e per la sua ripetuta, sulla destra.

5.9 Prove su pendio incanalato con deviatore di flusso

Le prove con deviatore di flusso (Figura 5.30) sono state realizzate solo con ghiaia grossa e zeoliti. Le prove su pendio incanalato hanno mostrato la sostanziale mancanza di interazione tra la ghiaia fine e il deviatore.

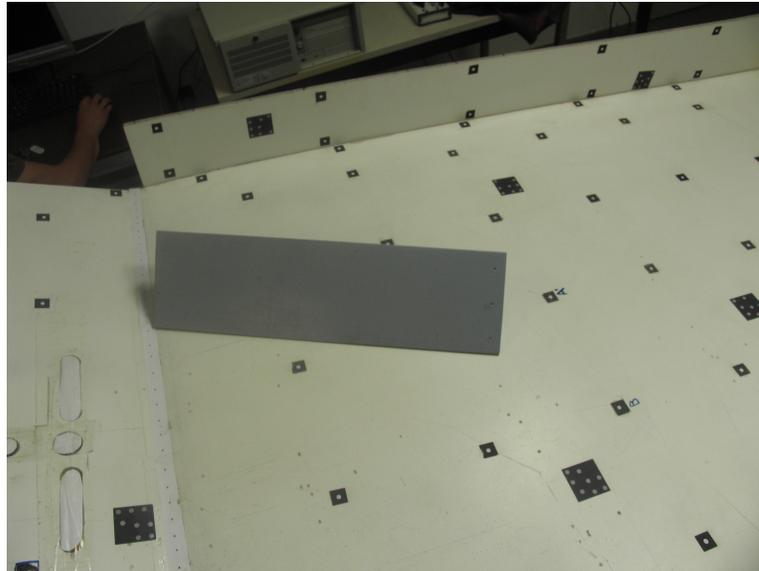


Figura 5.30: Il deviatore di flusso collocato sul piano di valle in prossimità del termine del tratto incanalato, utilizzato nelle prove su pendio incanalato con deviatore di flusso.

In Figura 5.31 e Figura 5.32 sono riportate le immagini dei depositi finali delle prove e delle loro ripetute per i due materiali utilizzati.

5.10 Creazione del DTM della canaletta per le prove su pendio aperto

5.10.1 Creazione del DTM mediante la macchina fotografica Canon

Dopo la calibrazione, tutti i target disposti sui piani della canaletta sono stati referenziati utilizzando immagini ottenute con la macchina fotografica Canon, in modo da ottenere un modello 3D, di buona qualità, dello scivolo comprensivo anche delle pareti di contenimento del piano di valle. Al modello è stato dato un sistema di riferimento

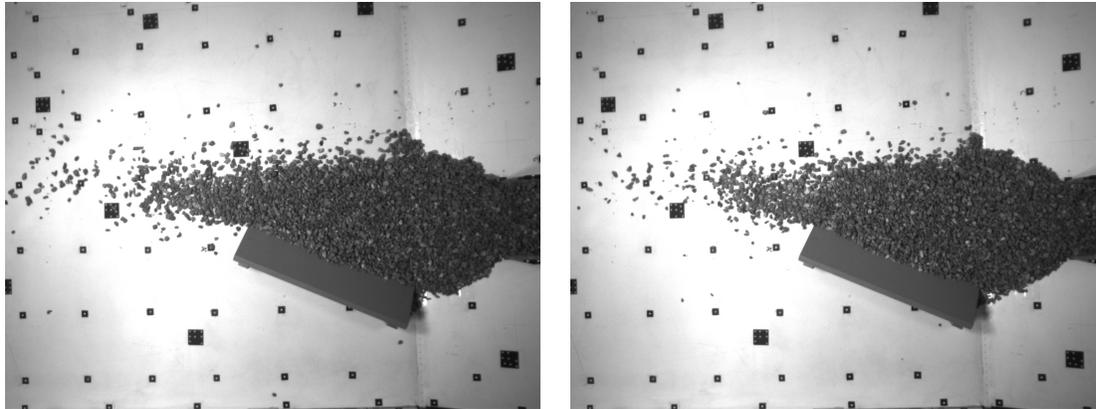


Figura 5.31: Deposito finale dell'ammasso granulare costituito da ghiaia grossa per la prima prova eseguita su pendio incanalato con deviatore, sulla sinistra, e per la sua ripetuta, sulla destra.

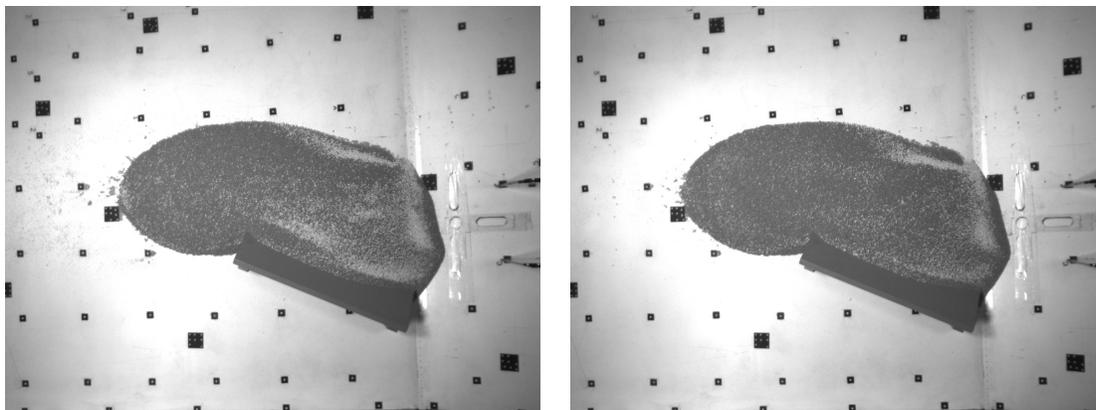


Figura 5.32: Deposito finale dell'ammasso granulare costituito da materiale granulare zeolitico per la prima prova eseguita su pendio incanalato con deviatore, sulla sinistra, e per la sua ripetuta, sulla destra.

con assi x e y posti sul piano di valle attraverso il sistema presente nel software Australis denominato 3-2-1. La procedura consente di fornire al programma i punti da cui partire per costruirsi il sistema di riferimento. Inizialmente va dato il punto di origine del sistema, secondariamente viene designato il punto la cui congiungente con l'origine avrebbe determinato la direzione e il verso dell'asse delle ascisse, infine viene designato il punto la cui congiungente con l'origine determina la direzione ed il verso dell'asse delle ordinate. L'asse delle altezze viene determinato automaticamente attraverso la regola della mano destra.

Se non viene imposto un sistema di riferimento, il software lo stabilisce sulla base dell'orientazione di una delle fotografie. In definitiva, nel modello 3D il piano di valle appare orizzontale ed il piano di monte appare inclinato di $21,5^\circ$ circa.

In seguito si è anche provveduto ad impostare la scala del modello misurando le distanze tra punti prefissati sullo scivolo e riportandole sul modello.

Il sistema di riferimento è stato tracciato con attenzione sul piano di valle della canaletta utilizzando una squadra ad angolo retto. Naturalmente, ognuna di queste operazioni comporta un errore. Le verifiche eseguite (attraverso la misura di ulteriori distanze) hanno mostrato differenze che possono essere considerate trascurabili. Il risultato finale è visibile in Figura 5.33.

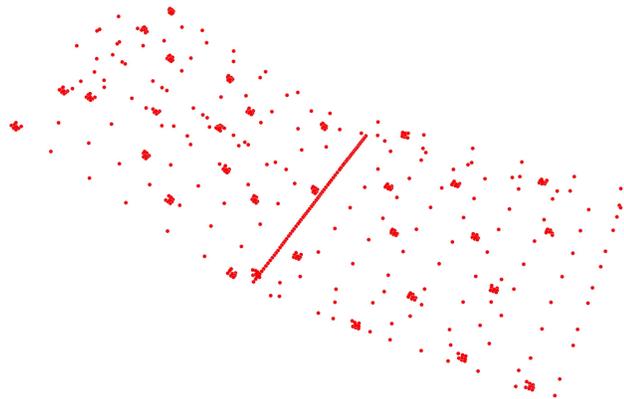


Figura 5.33: Restituzione fotogrammetrica 3D dei punti e codici della canaletta con Australis.

Il DTM della canaletta è stato ottenuto importando in ArcScene di ArcGIS le coordinate dei punti rilevati. In Figura 5.34 è rappresentato il DTM ottenuto per i due piani che costituiscono la canaletta. I tentativi eseguiti, con finalità puramente estetiche, di rappresentare nello stesso DTM anche le pareti laterali del piano di valle non hanno portato ai risultati attesi e non sono qui riportati.

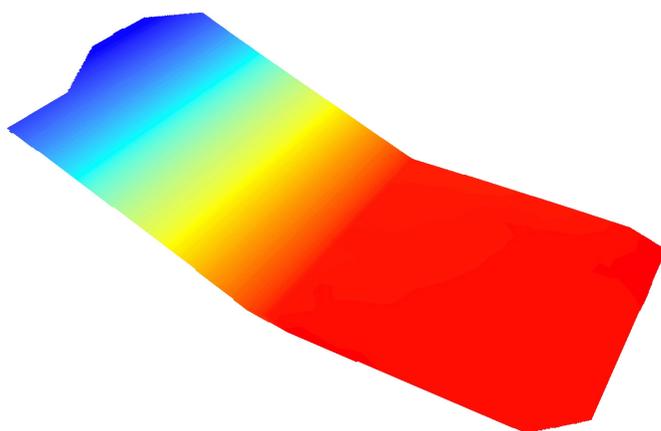


Figura 5.34: DTM ottenuto in ArcGis a partire dalle coordinate dei punti di Australis.

5.10.2 Creazione del DTM mediante le videocamere

Le telecamere sono state fissate alla struttura di supporto in alluminio da monte verso valle disponendo prima le due telecamere con ottica a distanza focale nominale di 6 mm, poi le quattro da 8 mm ed infine le due da 12 mm. In questo modo le videocamere da 12 mm sono state collocate ad una distanza maggiore dalla canaletta ed è stato attribuito loro un campo di vista maggiore (Figura 5.4).

Una corretta disposizione delle videocamere è fondamentale, in quanto Australis e PhotoScan non possono eseguire le misure automatiche se non sono in grado di individuare uno stesso punto in almeno tre immagini.

Per fare questo è stato utilizzato il sistema di acquisizione automatica delle videocamere per acquisire 8 foto, una per ciascuna videocamera. Le immagini sono state poi importate in Australis, utilizzando per ogni foto i dati di calibrazione della videocamera corrispondente. È stata eseguita la referenziazione automatica, seguita da quella manuale, tra le stesse immagini, ed è stata ottenuta l'area della canaletta coperta da almeno tre videocamere come in Figura 5.35.

La porzione di canaletta riprodotta era ampiamente sufficiente a descrivere la zona interessata dalla discesa e deposizione del materiale granulare. In Figura 5.36 è riportato il DTM ottenuto, mediante ArcGIS, dell'area coperta dalle videocamere.

5.10.3 Confronto tra i DTM della canaletta

Il confronto tra i modelli 3D elaborati con le immagini ottenute dalla macchina fotografica e con le immagini ottenute dalle videocamere ha mostrato differenze di lieve

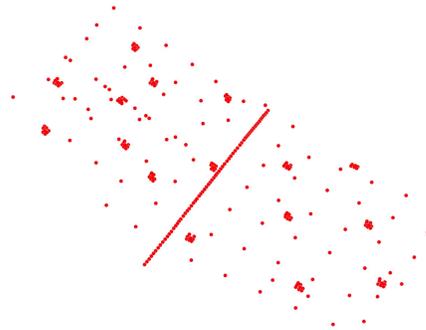


Figura 5.35: Copertura delle videocamere per le prove su pendio aperto. Ogni punto nel modello è visto da almeno tre immagini.

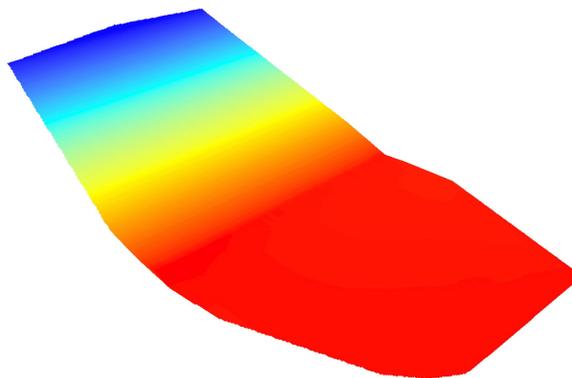


Figura 5.36: DTM della copertura delle videocamere per le prove su pendio aperto.

entità sia per quello che riguarda le quote dei punti sia per quello che riguarda l'inclinazione relativa tra il piano di valle ed il piano di monte della canaletta. D'altra parte l'RMS complessivo (una misura dello scarto quadratico medio della differenza tra le coordinate dei punti di controllo fornite e calcolate), fornito da Australis ha assunto valori decisamente minori nel caso dell'utilizzo delle immagini provenienti dalle videocamere (RMS pari a $0,97 \mu\text{m}$ rispetto a RMS pari a $4,91 \mu\text{m}$ nel caso d'uso della fotocamera Canon). Per questo motivo si è deciso di eseguire tutte le valutazioni descritte nel seguito con i dati ottenuti dalle videocamere.

5.11 Creazione del DTM del materiale per le prove su pendio aperto

Dopo aver salvato le immagini riprese dalle videocamere si è passati all'elaborazione della morfologia del sedimento in diversi istanti di tempo tramite il software Agisoft PhotoScan. È stato deciso di considerare, per ogni prova, circa una decina di istanti di tempo significativi per descrivere al meglio il comportamento del materiale. Di seguito è descritta la procedura per un singolo istante di tempo.

Il software PhotoScan utilizza una funzione di calibrazione della distorsione radiale a quattro parametri, diversa da quella utilizzata da Australis. I parametri ottenuti da Australis sono stati adattati e imposti al nuovo software.

In PhotoScan le diverse componenti del processo di restituzione fotogrammetrica sono completamente automatiche. Il sistema di riferimento e la scala sono stati impostati importando i punti referenziati in Australis. Per limitare l'uso della memoria (che influisce sui tempi di calcolo), le immagini sono state mascherate (Figura 5.37), escludendo dalla ricostruzione finale quanto non relativo al fenomeno in canaletta.

In Figura 5.38 è mostrato un esempio di modello 3D del sedimento ad un'istante di tempo arbitrario.

5.12 Creazione del DTM della canaletta per le prove su pendio incanalato

5.12.1 Pendio incanalato senza deviatore

La nuova configurazione sperimentale ha determinato il riposizionamento delle videocamere e la rigenerazione del DTM della canaletta. Le sponde del canale sono state

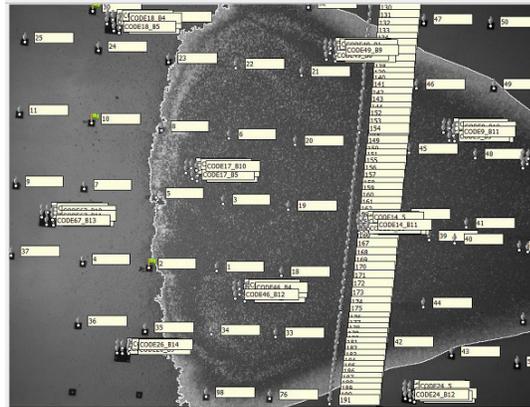


Figura 5.37: Esempio di mascheramento. Sono visibili anche i marker importati da Australis e ri-referenziati.

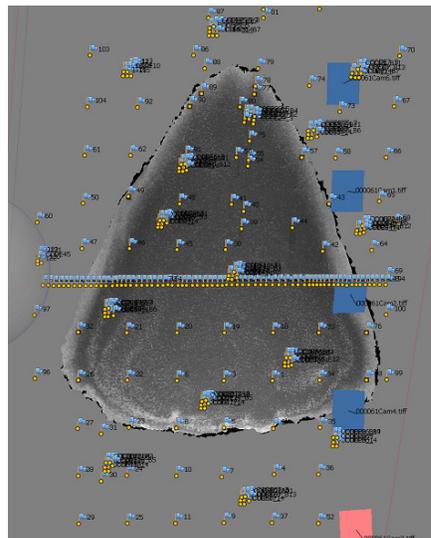


Figura 5.38: Prodotto finale di una restituzione fotogrammetrica con PhotoScan di un istante di tempo arbitrario. Sono visibili i marker importati da Australis e le posizioni delle videocamere in blu.

composte con il piano di base mediante la funzione Mosaic To New Raster di ArcGIS. Per facilitare la generazione 3D delle sponde, sulla parte superiore sono stati riportati dei tie-point disposti a coppie come in Figura 5.26.

In Figura 5.39 è mostrato il DTM ottenuto dalle immagini riprese dalle videocamere.

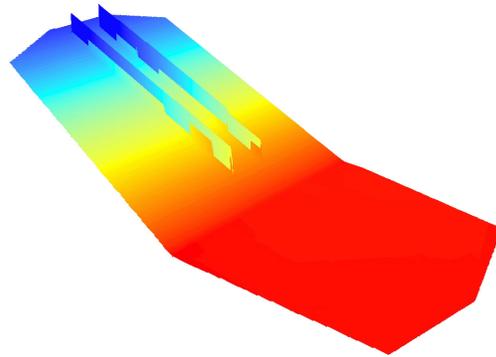


Figura 5.39: DTM della canaletta con le sponde, ottenuto con dalle immagini delle videocamere.

5.12.2 Pendio incanalato con deviatore

Passaggi analoghi sono stati adottati per introdurre il modello 3D del deviatore di flusso nella canaletta provvista di sponde. In Figura 5.40 è mostrato il DTM ottenuto usando le immagini delle videocamere.

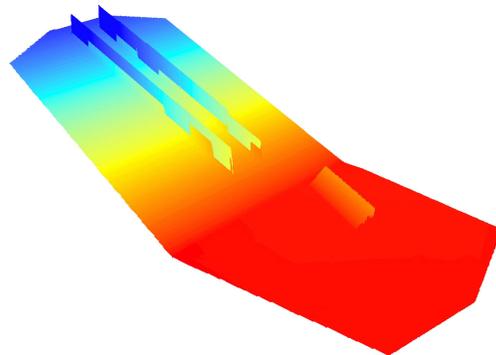


Figura 5.40: DTM dello scivolo con canaletta e deviatore ricostruito con la visuale delle videocamere

5.13 Creazione del DTM del materiale per le prove su pendio incanalato

Per la creazione dei DTM del materiale delle prove su pendio incanalato sono state fatte le stesse operazioni messe in atto per le prove su pendio aperto.

5.14 Creazione del DTM composto

Per ogni istante di tempo considerato sono stati esportati il DTM e l'ortofoto del materiale direttamente da PhotoScan sotto forma di file Ascii e Tiff. Con lo strumento "Mosaic to New Raster" di ArcGIS è stato, infine, costruito il DTM che rappresenta insieme la canaletta e il materiale (Figura 5.41, Figura 5.42). Una rappresentazione cinematica della evoluzione tridimensionale dell'ammasso nel tempo è stata ottenuta generando un video, a scala dei tempi pari a 1, con il software Windows Live Movie Maker.

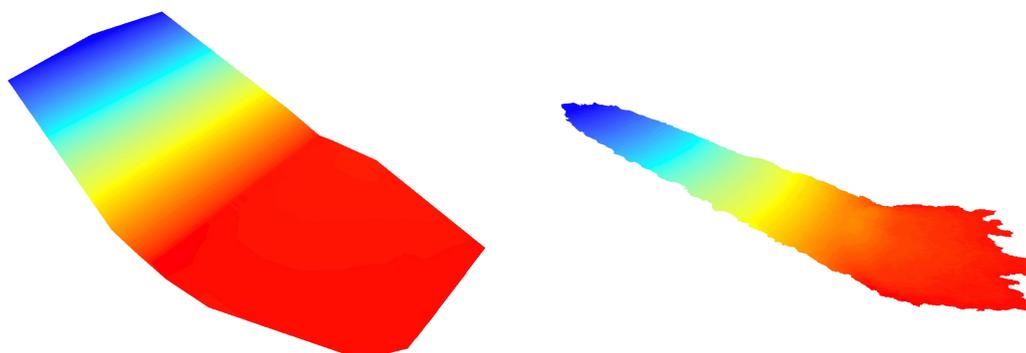


Figura 5.41: A sinistra, il DTM della canaletta ottenuto con le videocamere; a destra, il DTM del materiale ad un certo istante moto.

Nelle Figure 5.43, 5.44, 5.45, 5.46, 5.47, 5.48, 5.49 e 5.50 sono rappresentati i DTM generati ai vari istanti di tempo nelle configurazioni sperimentali considerate.

5.15 Evoluzione del volume del materiale nel tempo

Molte sono le valutazioni che possono essere eseguite una volta determinata in forma tridimensionale l'evoluzione dell'ammasso graulare.

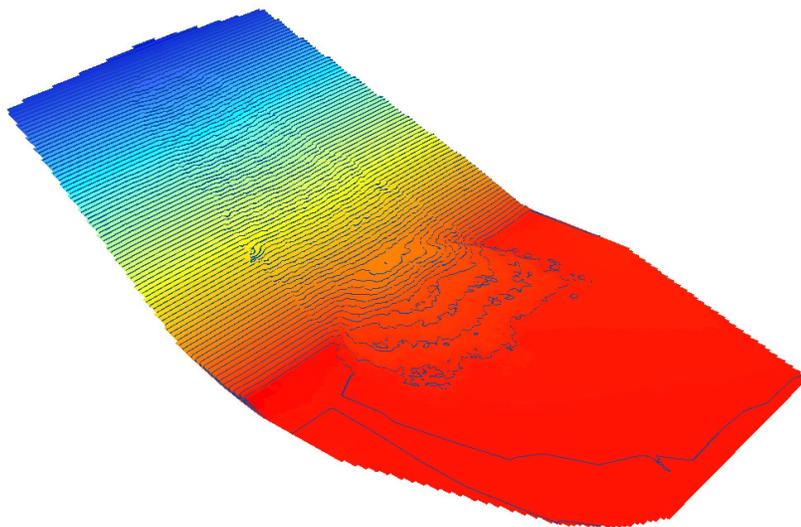


Figura 5.42: Il DTM ottenuto dalla fusione del DTM del doppio piano inclinato e del DTM del materiale ad un certo istante del moto (Figura 5.41).

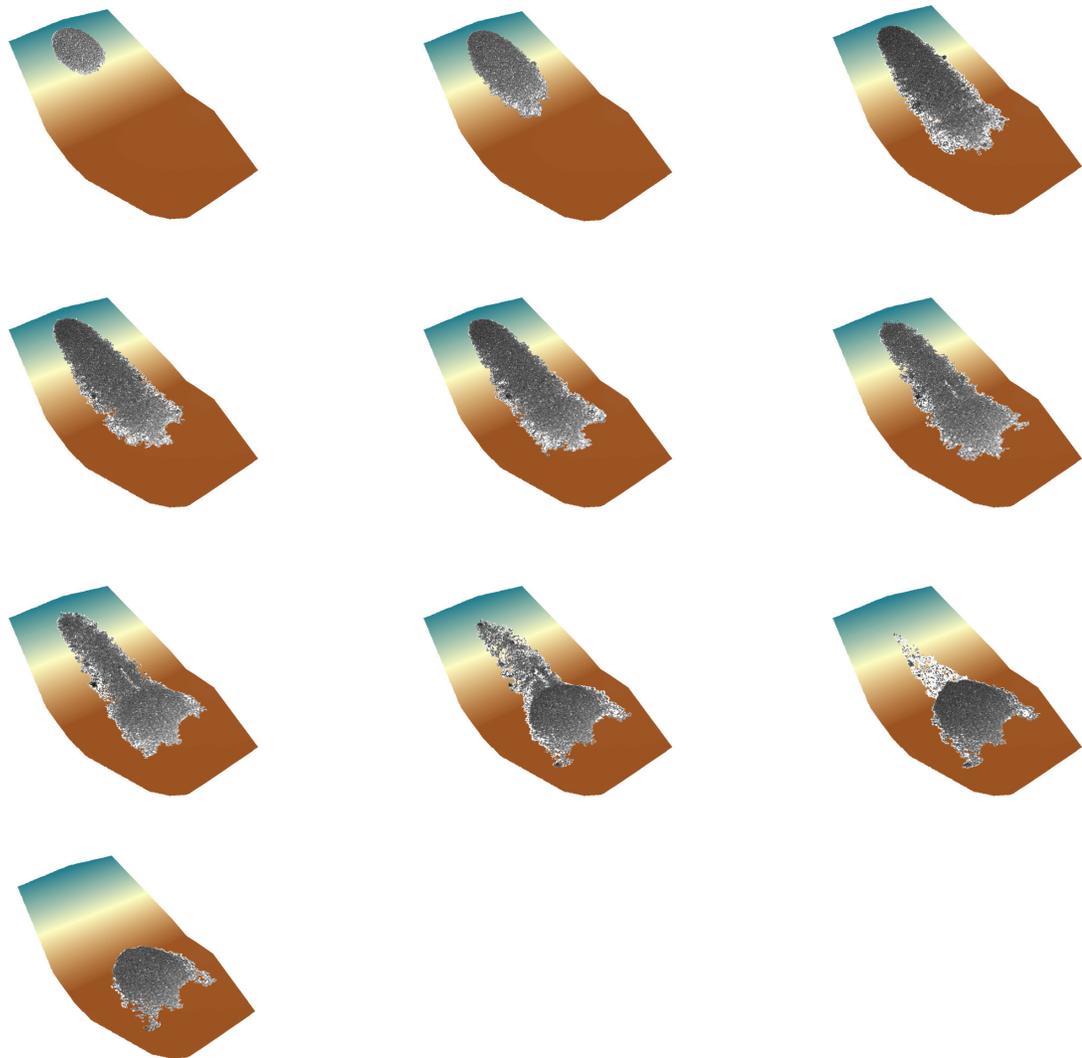


Figura 5.43: Qui sono mostrati i DTM ottenuti dalle prove su pendio aperto con ghiaia grossa, per ogni istante di tempo considerato.

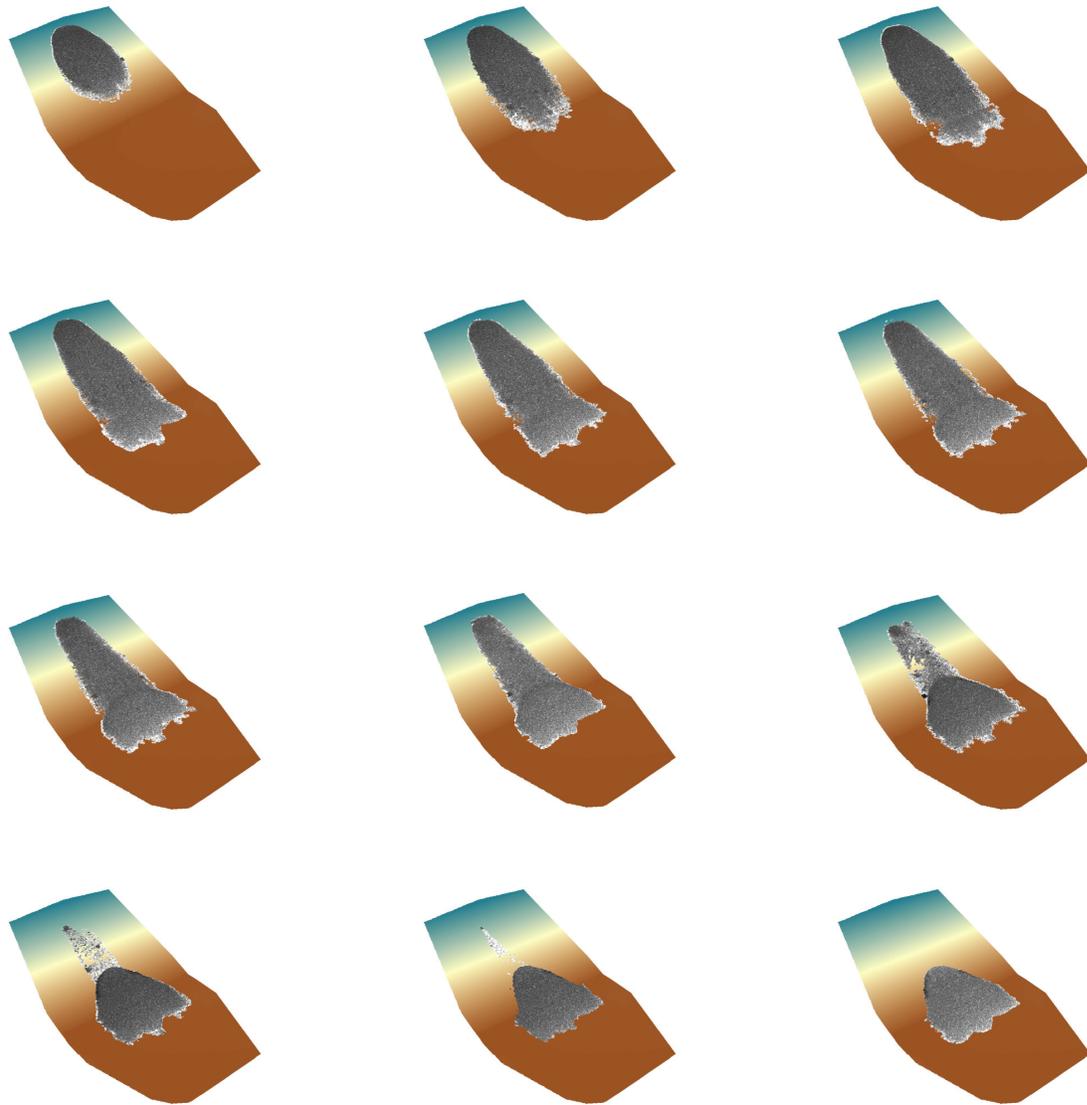


Figura 5.44: Qui sono mostrati i DTM ottenuti dalle prove su pendio aperto con ghiaia fine, per ogni istante di tempo considerato.

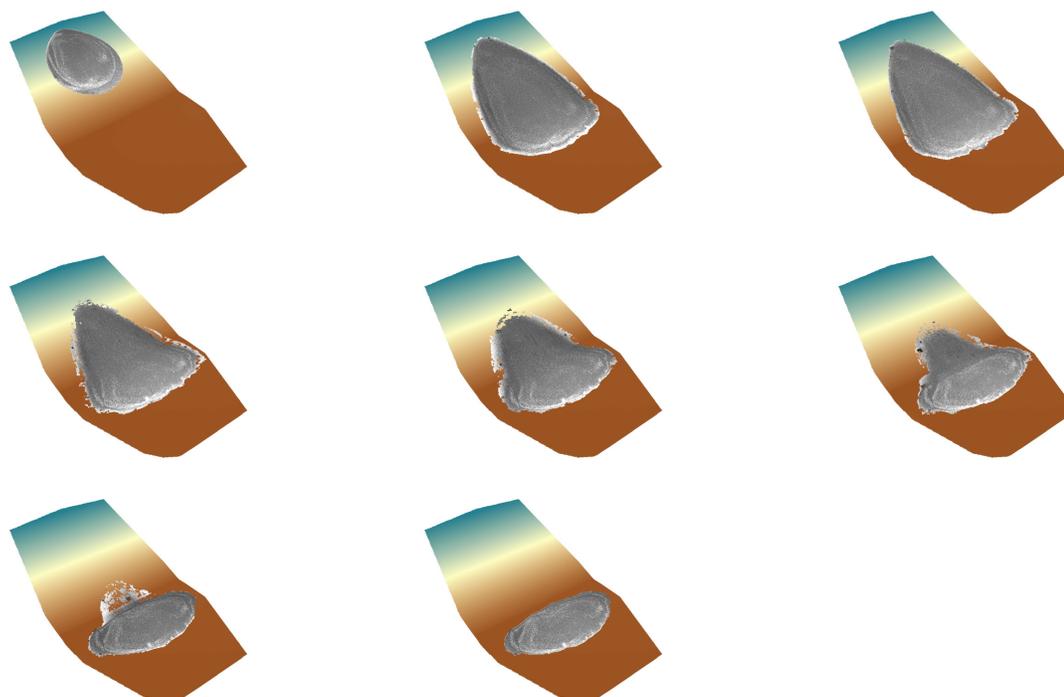


Figura 5.45: Qui sono mostrati i DTM ottenuti dalle prove su pendio aperto con zeoliti, per ogni istante di tempo considerato.

In quanto segue sono stati stimati i volumi totali occupati dall'intero ammasso granulare nel tempo all'interno della stessa prova. La valutazione è stata eseguita con gli strumenti messi a disposizione dall'estensione 3D Analyst di ArcGIS.

5.15.1 Risultati per le prove su pendio aperto

Dopo l'elaborazione delle prove al computer sono stati ottenuti grafici per la valutazione della variazione dei volumi nel tempo per le prove a pendio aperto (riportati in Figura 5.51). Alcuni istanti di tempo risultavano affetti da errori probabilmente intrinseci a tutto il processo fotogrammetrico.

5.15.2 Risultati per le prove su pendio incanalato

Non conoscendo a priori il volume, come nel caso delle prove a pendio aperto dove c'era il cono, si sono prese le misure delle dimensioni del deposito iniziale per ogni prova, cosicché sarebbe stato possibile ricavare il volume iniziale.

Dai volumi iniziali si sono ottenuti i grafici di Figura 5.52, per il pendio incanalato semplice, i grafici di Figura 5.53, per il pendio incanalato col deviatore.

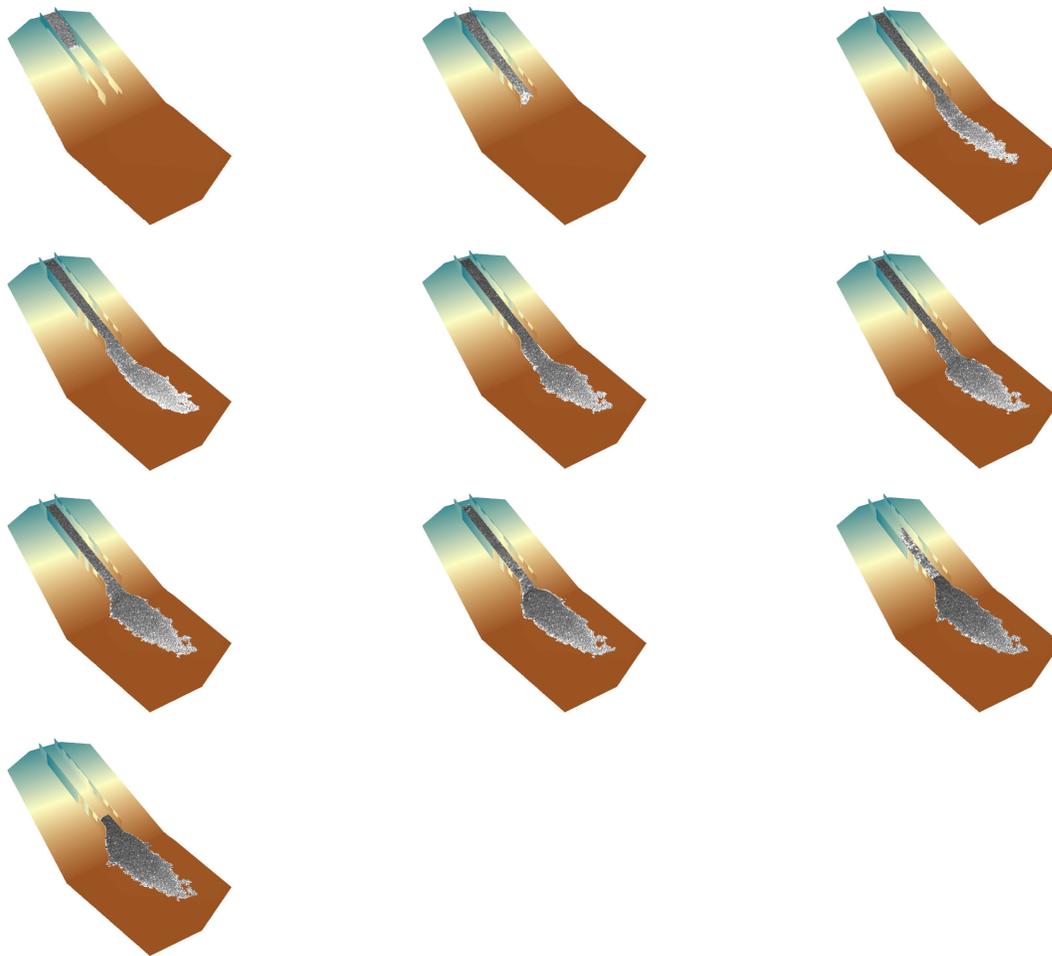


Figura 5.46: Qui sono mostrati i DTM ottenuti dalle prove su pendio incanalato con ghiaia grossa, per ogni istante di tempo considerato.

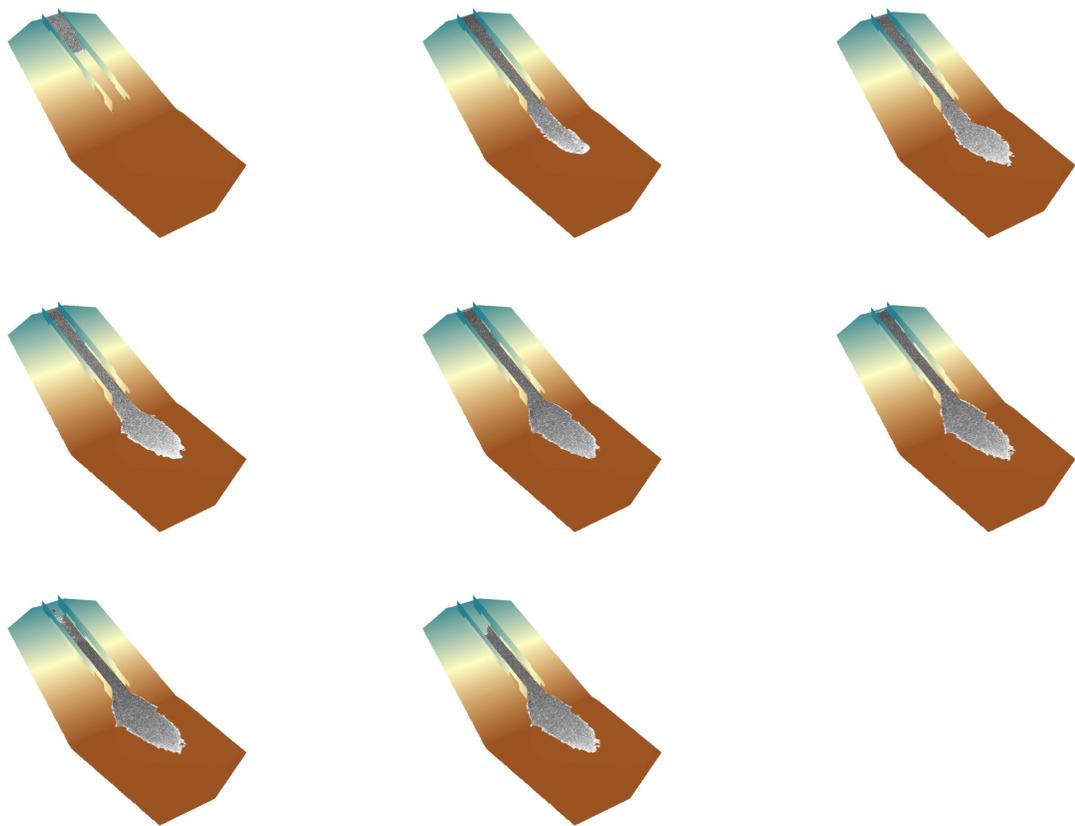


Figura 5.47: Qui sono mostrati i DTM ottenuti dalle prove su pendio incanalato con ghiaia fine, per ogni istante di tempo considerato.

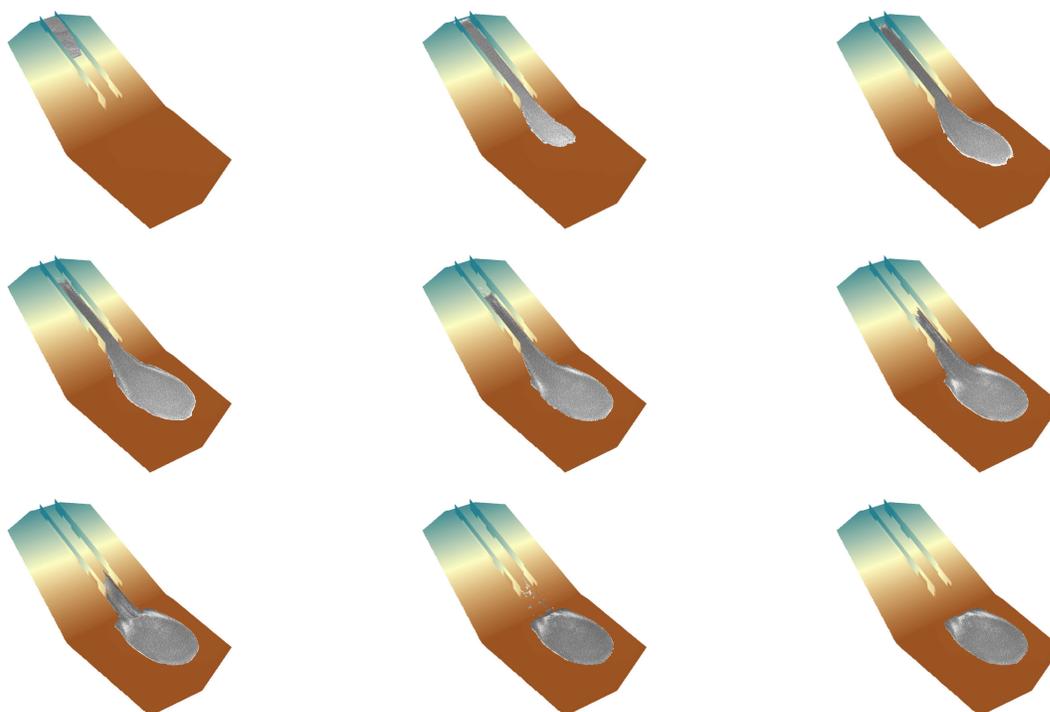


Figura 5.48: Qui sono mostrati i DTM ottenuti dalle prove su pendio incanalato con zeoliti, per ogni istante di tempo considerato.

5.16 Osservazioni sulle prove eseguite

5.16.1 Osservazioni sulle prove su pendio aperto

La durata della prova su pendio aperto realizzata con materiale zeolitico è stata di 2,67 s (angolo d'attrito sul fondo pari a $20,9^\circ$), quella con ghiaia grossa di 3,67 s (angolo d'attrito sul fondo pari a $32,9^\circ$) e quella con ghiaia fine di 4,60 s (angolo d'attrito sul fondo pari a $30,3^\circ$). La prova di minor durata è quella con minore attrito sul fondo. Non appare facilmente interpretabile il maggior tempo impiegato dalla prova con ghiaia fine rispetto al tempo impiegato nella prova con ghiaia grossa. Si deve forse far risalire alla diversa reologia che il materiale granulare presenta, rispetto a quella descritta mediante l'angolo d'attrito sul fondo, come misurato in laboratorio.

Nel determinare il comportamento dei vari materiali negli istanti iniziali del moto, il ruolo del gradiente della superficie libera è preponderante. Quanto scritto è particolarmente vero nel caso del materiale ghiaioso, che presenta un angolo di attrito sul fondo maggiore dell'inclinazione del piano di monte della canaletta sperimentale.

L'espansione laterale del materiale zeolitico è molto maggiore, fin dai primi istanti del moto, rispetto all'espansione del materiale ghiaioso.

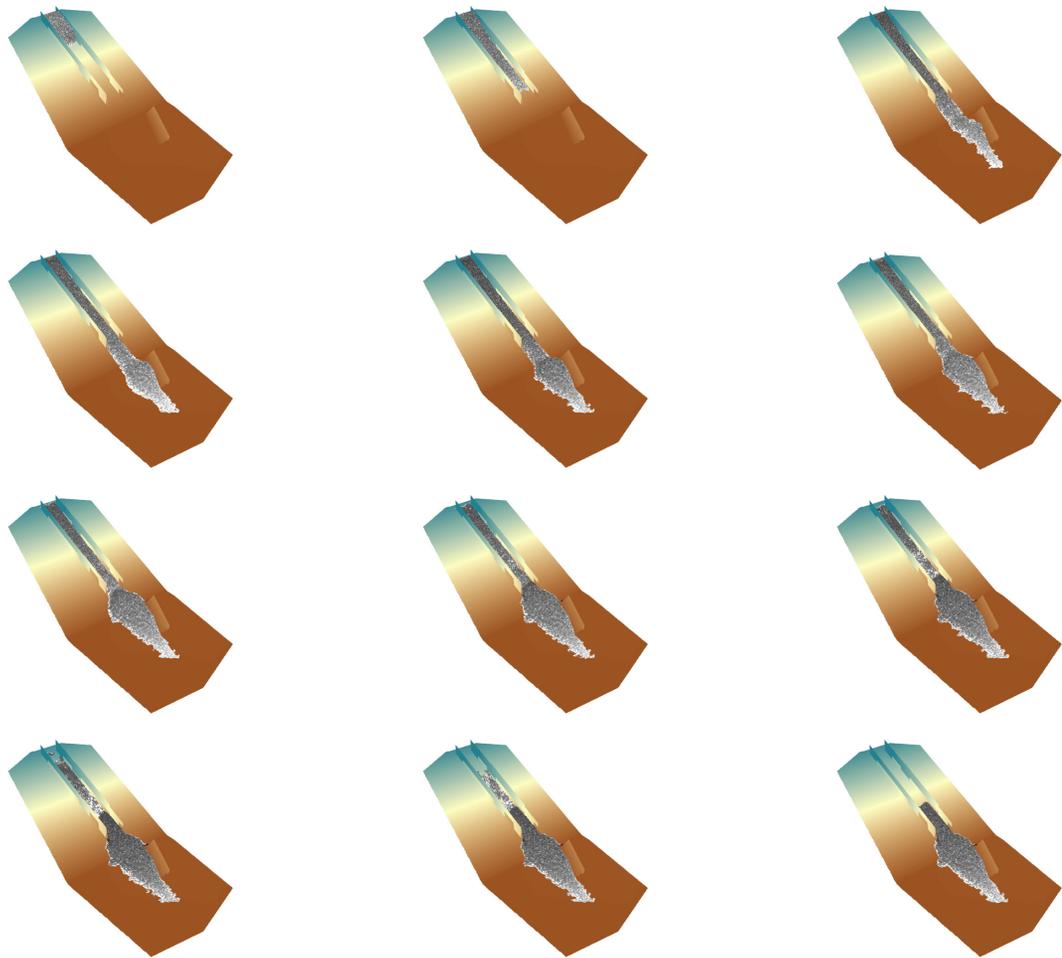


Figura 5.49: Qui sono mostrati i DTM ottenuti dalle prove su pendio incanalato con deviatore con ghiaia grossa, per ogni istante di tempo considerato.

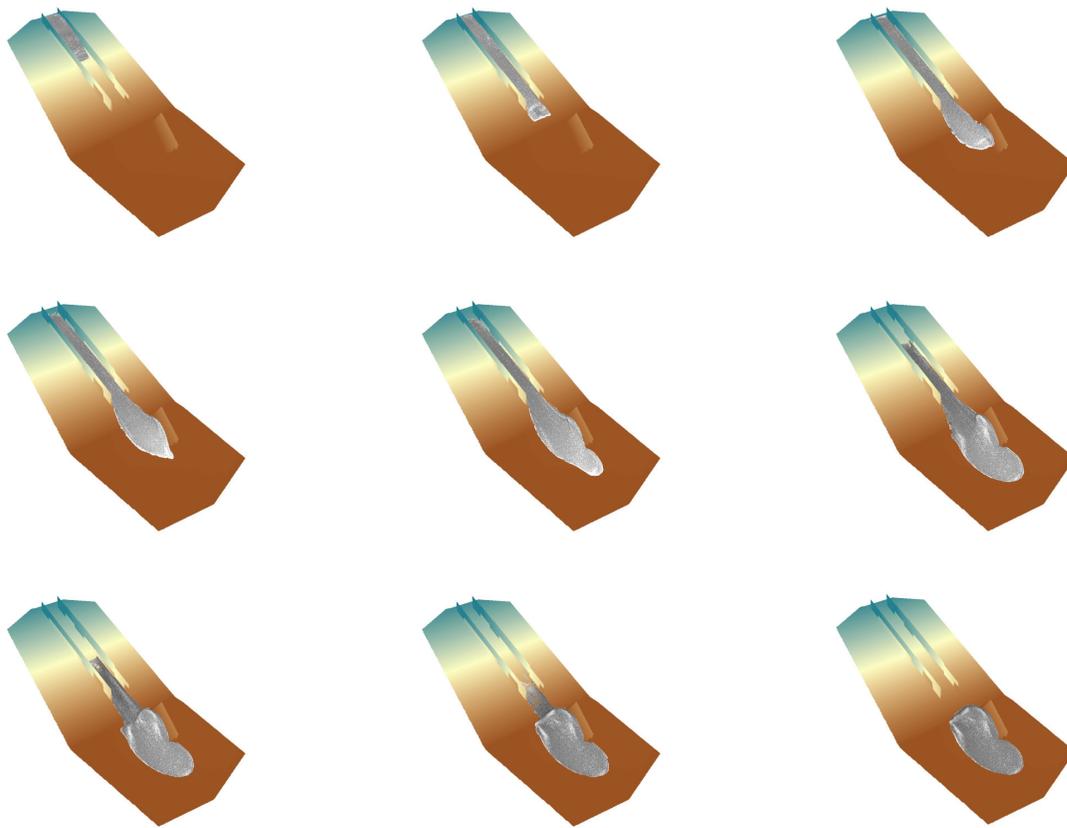


Figura 5.50: Qui sono mostrati i DTM ottenuti dalle prove su pendio incanalato con deviatore con zeoliti, per ogni istante di tempo considerato.

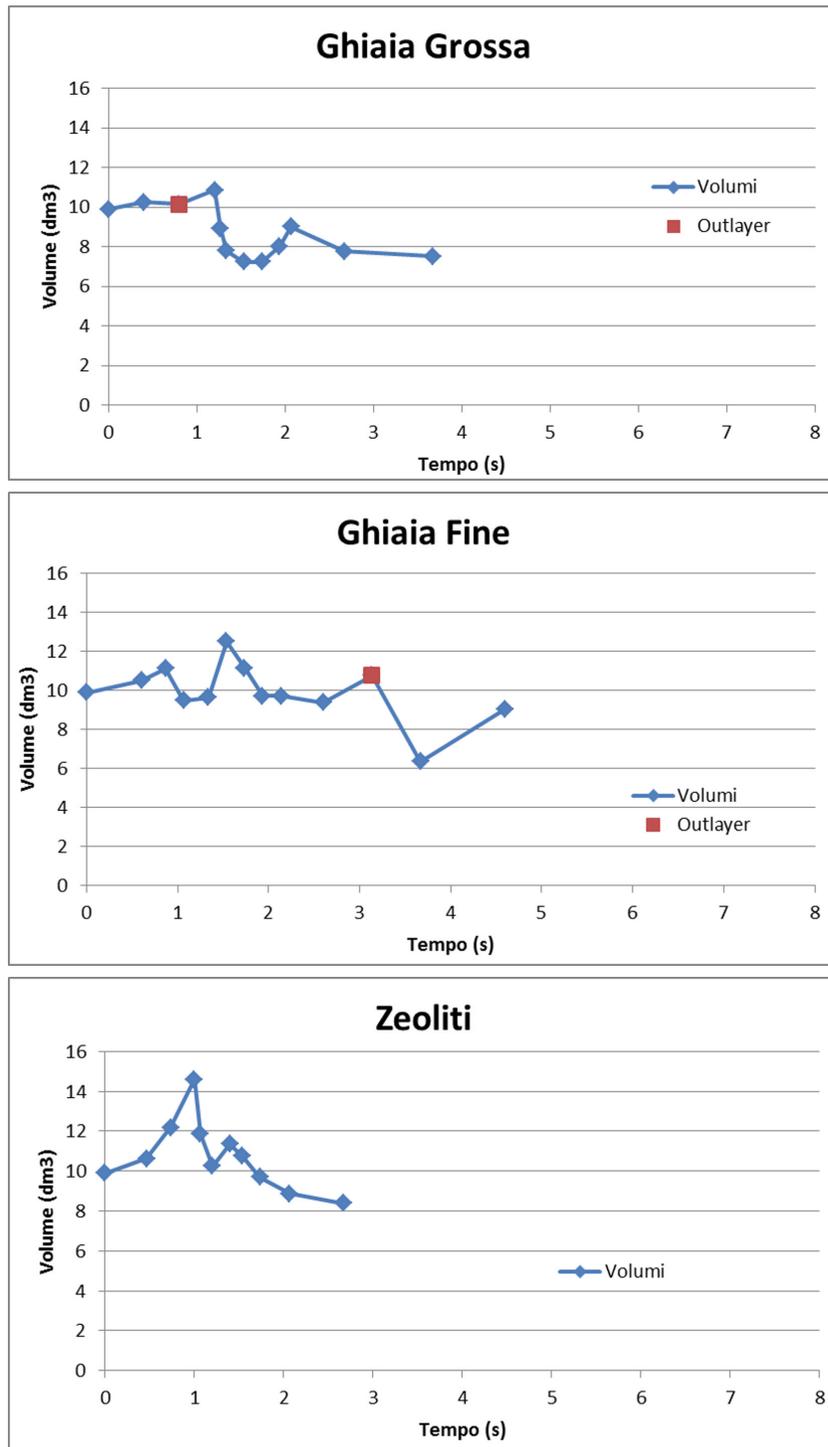


Figura 5.51: Andamento dei volumi occupati dall'ammasso granulare, in alcuni istanti di tempo, per le prove su pendio aperto. In alto, nel caso di ghiaia grossa, al centro, nel caso di ghiaia fine e, in basso, nel caso di materiale zeolitico.

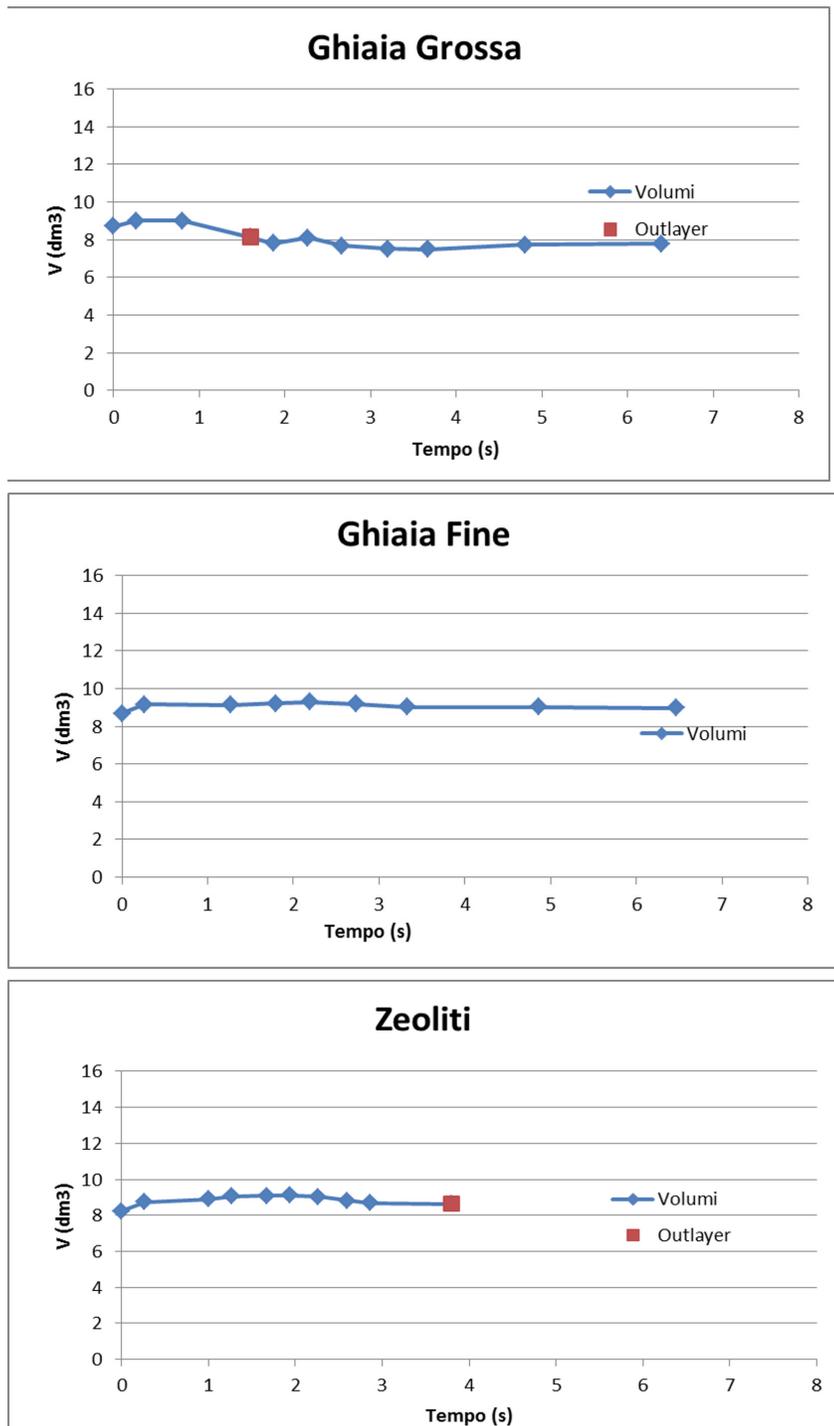


Figura 5.52: Andamento dei volumi occupati dall'ammasso granulare, in alcuni istanti di tempo, per le prove su pendio incanalato senza deviatore di flusso. In alto, nel caso di ghiaia grossa, al centro, nel caso di ghiaia fine e, in basso, nel caso di materiale zeolitico.

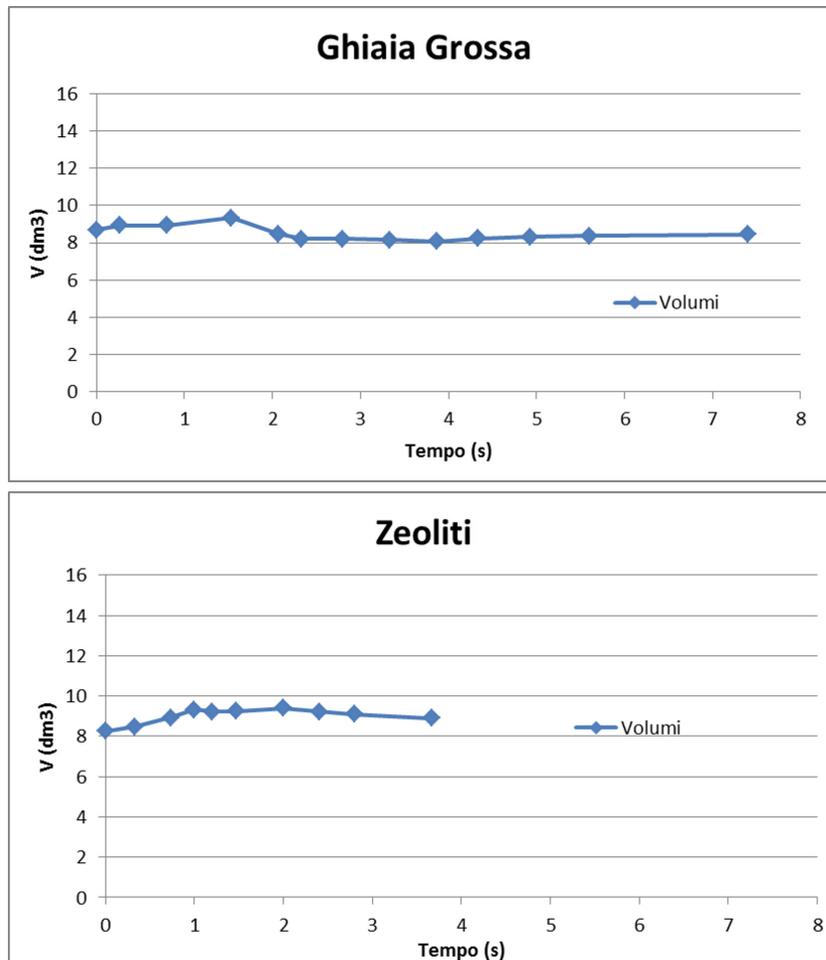


Figura 5.53: Andamento dei volumi occupati dall'ammasso granulare, in alcuni istanti di tempo, per le prove su pendio incanalato in presenza di deviatore di flusso. In alto, nel caso di ghiaia grossa e, in basso, nel caso di materiale zeolitico.

La distanza d'arresto è maggiore per la ghiaia grossa, mentre negli altri due casi, la differenza è minima. La risalita a monte del deposito risulta maggiore per la ghiaia fine, ben oltre il cambio di pendenza. Il materiale zeolitico si deposita tutto sul piano di valle.

Per quello che riguarda l'andamento dei volumi nel tempo nelle prove con ghiaia grossa e materiale zeolitico su pendio aperto (Figura 5.51) si nota una espansione iniziale seguita da una contrazione significativa fino all'assestamento finale. Nel caso di ghiaia fine, l'andamento del volume appare meno variabile. In tutti e tre i casi, il volume finale è minore del volume iniziale, ad indicare il maggiore compattamento prodotto dalla fase di arresto del materiale.

5.16.2 Osservazioni sulle prove su pendio incanalato senza deviatore

In questo caso la durata dei test è maggiore rispetto al caso su pendio aperto (circa 4,0 s per il materiale zeolitico e circa 6,5 s per il materiale ghiaioso). Come nel caso precedente la durata della prova con zeoliti è minore rispetto agli altri due casi.

Si osserva, come nel caso precedente, l'effetto preponderante del gradiente della superficie libera nel determinare il moto agli istanti iniziali.

La distanza d'arresto è maggiore rispetto al caso precedente e massima nel caso nel materiale zeolitico e della ghiaia grossa.

È ancora più evidente, rispetto al caso precedente, la variazione di velocità trasversale nella zona incanalata.

L'andamento dei volumi nel tempo è, in generale, molto meno marcato che nel caso precedente. Nelle prove con ghiaia fine e con materiale zeolitico, si verifica una iniziale dilatazione, alla quale segue una contrazione nella fase di arresto con volumi molto prossimi a quelli iniziali. Al contrario, con la ghiaia grossa, pur con variazioni più contenute, l'andamento del volume non differisce da quello osservato su pendio aperto, con una compattazione finale maggiore rispetto alla iniziale.

5.16.3 Osservazioni sulle prove su pendio incanalato con deviatore di flusso

I test sono stati eseguiti su due materiali, escludendo la ghiaia fine che, nella configurazione sperimentale considerata, non è in grado di raggiungere il deviatore. L'andamento dei volumi e la durata dei test sono confrontabili con i valori osservati nelle preceden-

ti prove incanalate. In entrambi i casi è evidente l'efficienza del deviatore di flusso nel modificare la forma del deposito finale, mentre non viene modificata la distanza d'arresto determinata dal fronte dell'ammasso in avanzamento, non influenzata dal deviatore.

Capitolo 6

Altre ossevizioni di campo

6.1 Analisi delle forme di fondo osservate nell'alveo del rio Acquabona

Durante l'escursione del 25 maggio 2015 sono state osservate nell'alveo del rio Acquabona, poco a monte della stazione di valle del sistema di monitoraggio, forme di fondo ad andamento sinuoso provocate dal deflusso idrico, all'interno dell'alveo formato dalle colate di detriti.

È ben noto in letteratura [13] che il fondo piano di un corso d'acqua non è stabile e che tende ad evolvere verso forme del tipo qui osservate. Al fine della loro caratterizzazione, sono state acquisite numerose immagini con la macchina fotografica Fujifilm Finepix F70 EXR, è stata rilevata la pendenza media locale, pari a circa 0,07 m/m e il diametro del materiale che localmente caratterizza il fondo, pari a circa 2-3 cm.

L'elaborazione fotogrammetrica delle immagini, eseguita a seguito della calibrazione della macchina fotografica, ha permesso di ottenere il DTM dell'area come in Figura 6.1. In Figura 6.2 è stata isolata la parte dell'alveo che presenta la forma ondulata di interesse.

In Figura 6.3 al tratto rilevato è stata assegnata una ascissa longitudinale ed è stato definito un sistema di riferimento. La forma di fondo è stata identificata mediante la sua ascissa curvilinea centrale e attraverso la sua occupazione trasversale. Infine, la forma è stata campionata con un intervallo spaziale di 0,5 m (Figura 6.4).

L'analisi di Fourier del canale campionato ha fornito una lunghezza d'onda minima significativa di 2,5 m e una massima di 24 m (Figura 6.5).

Una stima del valore medio della larghezza del canale centrale rispetto alla larghezza dell'alveo ha fornito il valore di 0,16.

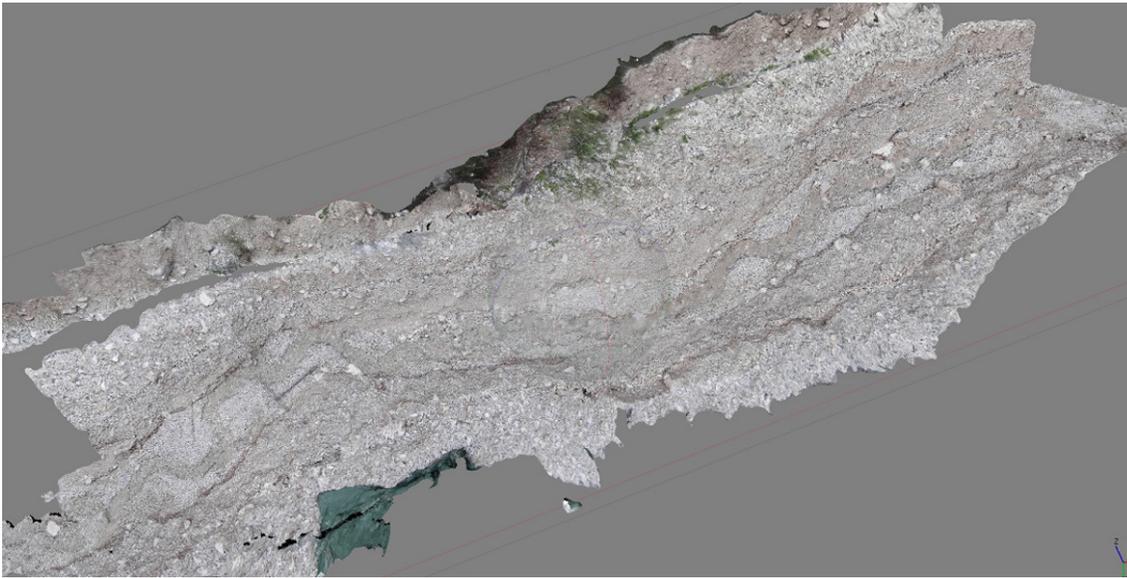


Figura 6.1: Restituzione fotogrammetrica di un tratto dell'alveo del rio Acquabona alla quota della stazione di valle del sistema di monitoraggio, alla data del 25 maggio 2015.



Figura 6.2: Parte dell'alveo del rio Acquabona interessata dalla forma ondulata del fondo, ottenuta dalla restituzione fotogrammetrica di Figura 6.1.

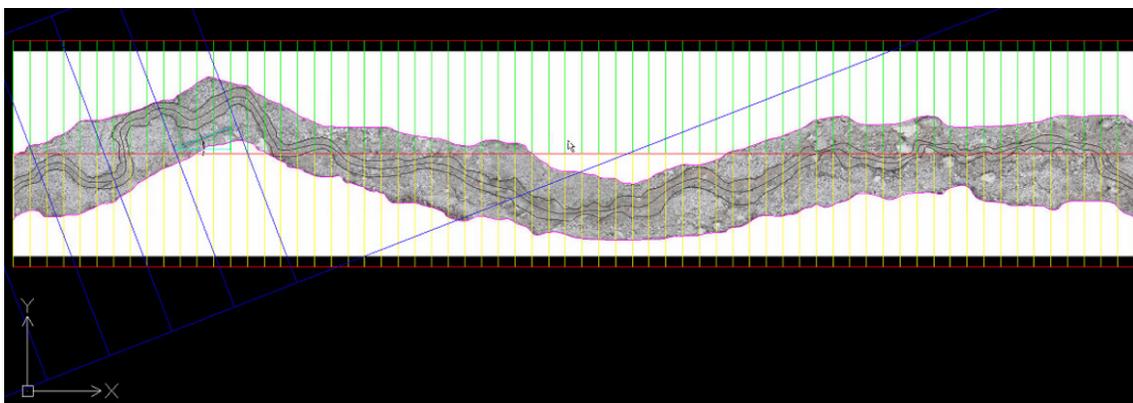


Figura 6.3: Rappresentazione planimetrica di un tratto del rio Acquabona nei pressi della stazione di valle.

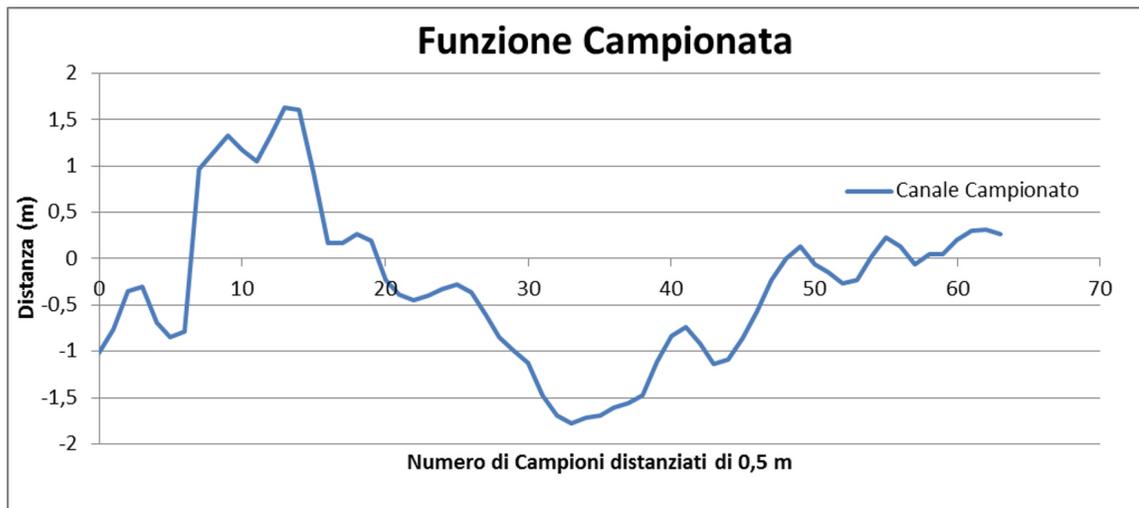


Figura 6.4: Funzione campionata ottenuta dalla elaborazione di Figura 6.3.

6.2 Analisi fotogrammetrica di una frana

Durante l'uscita del 18 marzo 2015 sono state riprese varie immagini, con la macchina fotografica Fujifilm precedentemente citata, di una frana in evoluzione collocata sulla sponda destra del canale creato dalle colate del rio Acquabona, poco a valle della formazione di Raibl.

Le immagini sono state elaborate fotogrammetricamente, ottenendo il risultato grafico presentato in Figura 6.6. Non è stato possibile definire la scala della elaborazione fotogrammetrica nel periodo dedicato a questo lavoro, a causa della mancanza di control points sul posto. Questo passo è necessario per poter eseguire stime di distanze e volumi. La qualità della restituzione appare comunque buona e sembra opportuno completare il rilievo con la determinazione delle coordinate di un numero adeguato di punti riconoscibili a terra.

6.3 Precipitazioni misurate e previsioni

In questa sezione vengono confrontati i valori di precipitazione giornalieri verificatisi presso il pluviometro di valle e di monte nell'area del rio Acquabona con i valori previsti dal servizio ILMETEO.it il giorno precedente, due giorni prima e tre giorni prima del giorno riferito al pluviometro per la località di Cortina. Il confronto è stato fatto dall'ultima settimana di luglio 2015, fino alla fine di agosto 2015. L'obiettivo è quello di valutare la capacità previsionale del servizio e l'eventuale possibilità di prendere in considerazione le previsioni al fine della previsione delle colate di detriti.

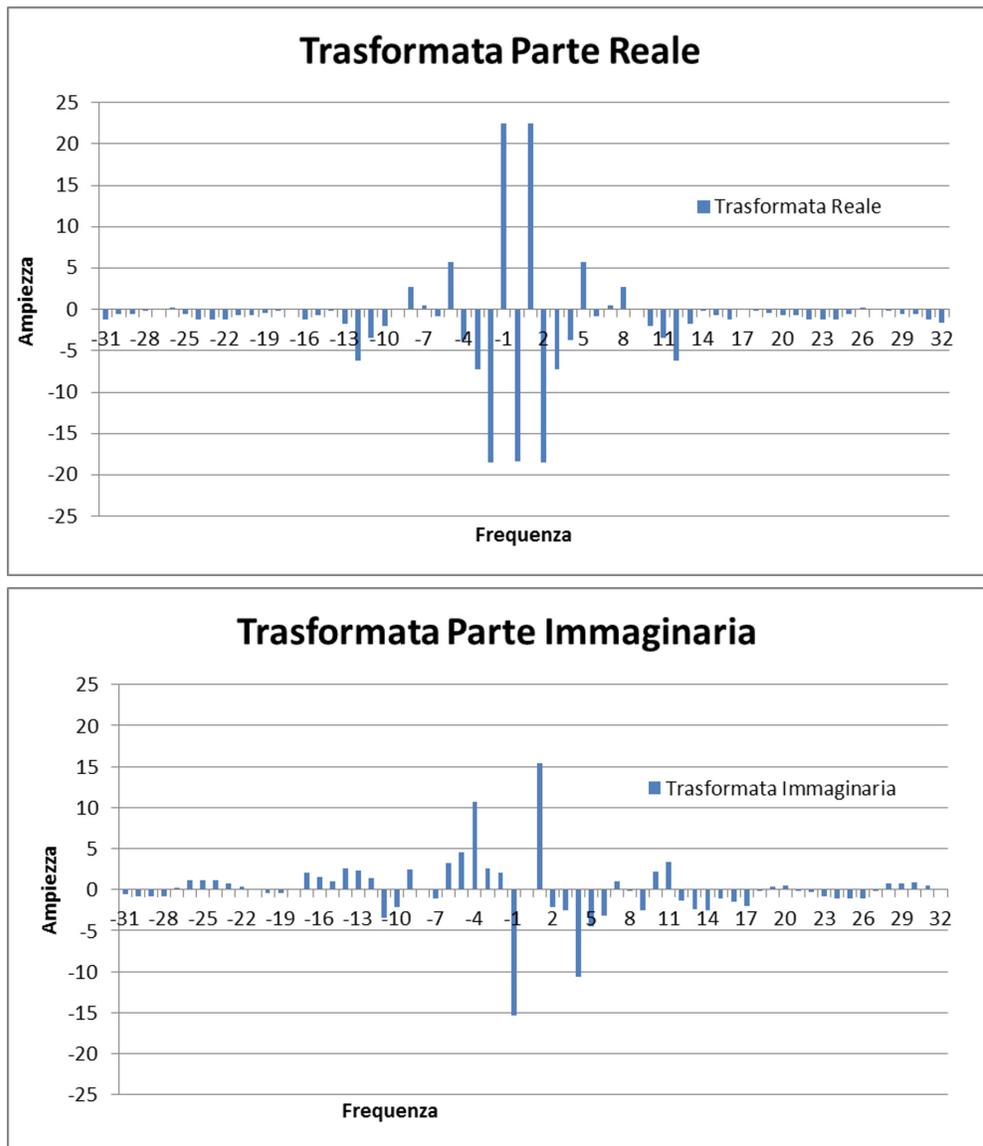


Figura 6.5: Parte reale e parte immaginaria della Trasformata di Fourier della funzione campionata ottenuta.

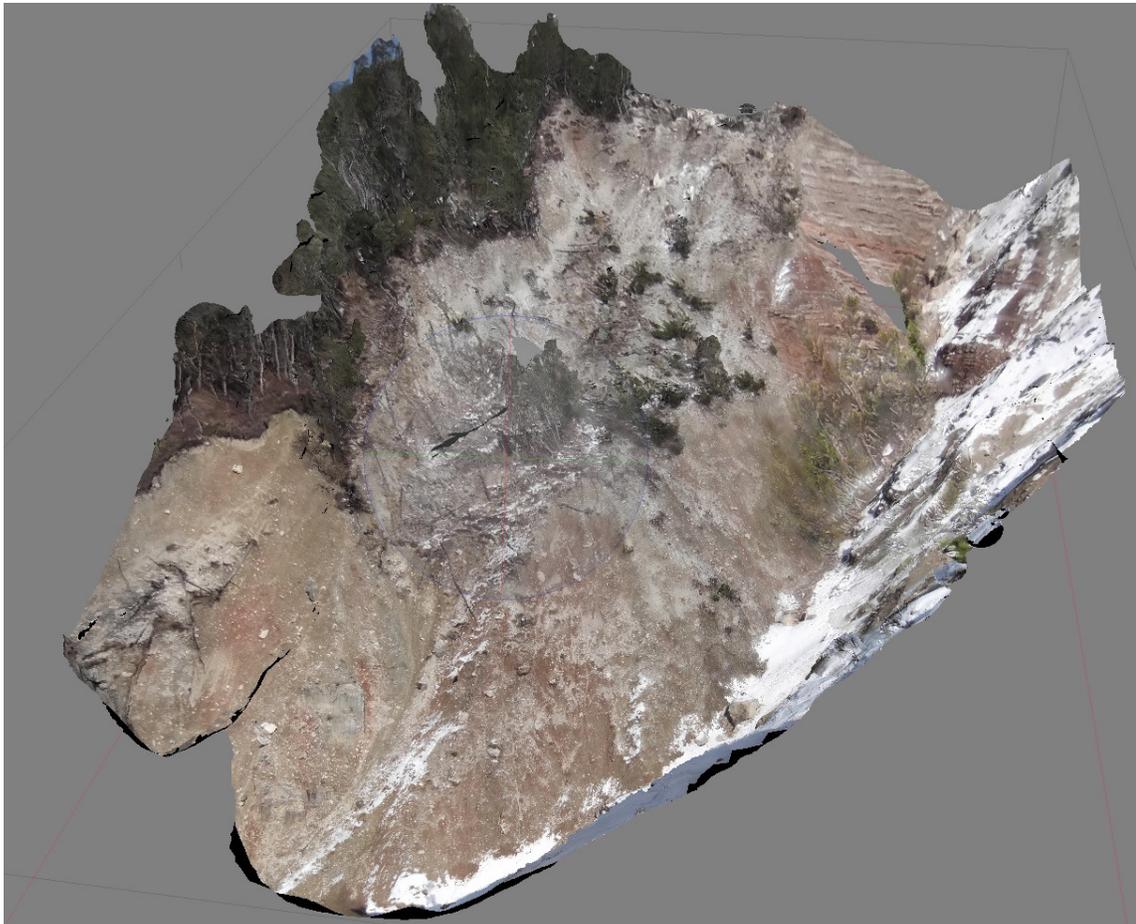


Figura 6.6: Restituzione fotogrammetrica della frana rilevata in sponda destra del rio Acquabona poco a valle della formazione di Raibl, il 18 marzo 2015.

In Figura 6.7 è mostrato il confronto tra la media delle precipitazioni giornaliere dei pluviometri e la media delle tre previsioni dei giorni precedenti. Dalla figura si nota una notevole discordanza per quello che riguarda il valore della precipitazione. In particolare per il giorno 8 agosto, giorno durante il quale si è verificata la colata di detriti descritta in precedenza, i valori di previsione sono stati di 7,5 mm a -3 giorni, 5,0 mm a -2 giorni e 6,7 mm a -1 giorno, rispetto ai valori di 33,0 mm al pluviometro di valle e 44,6 mm al pluviometro di monte.

In Figura 6.8 sono rappresentate le cumulate delle precipitazioni medie sui tre giorni previste e misurate ai pluviometri. Come si nota, benché la forma della funzione sia piuttosto diversa, a causa soprattutto dell'evento dell'8 agosto, il valore finale delle cumulate risulta sostanzialmente identico.

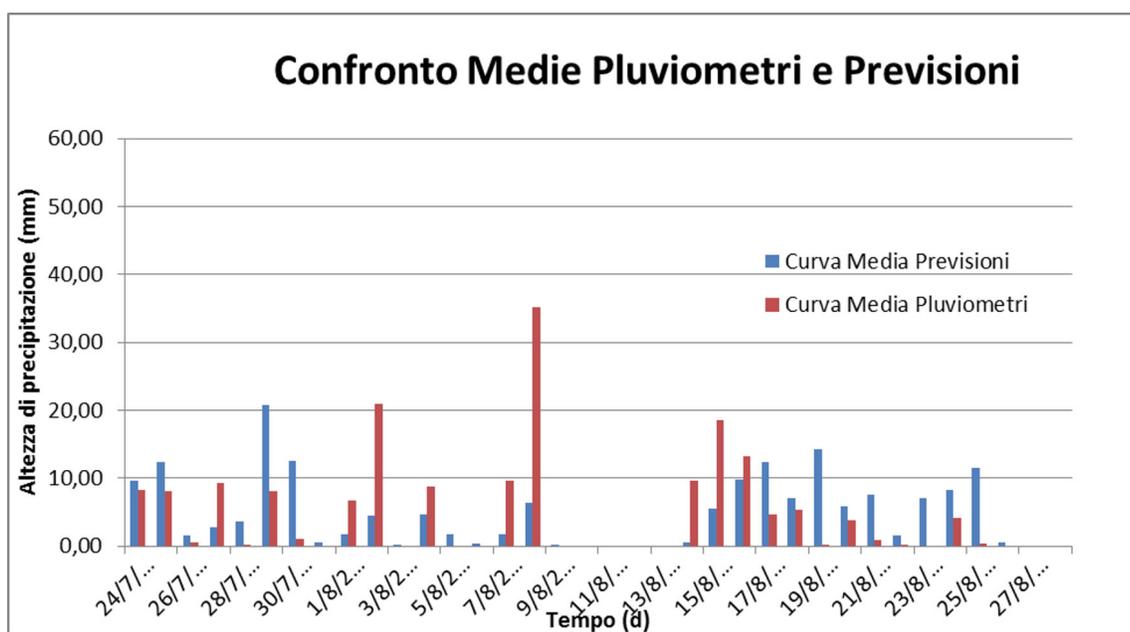


Figura 6.7: Altezze di precipitazione giornaliera come media dei valori ai pluviometri e valore corrispondente come media delle previsioni nei tre giorni precedenti.

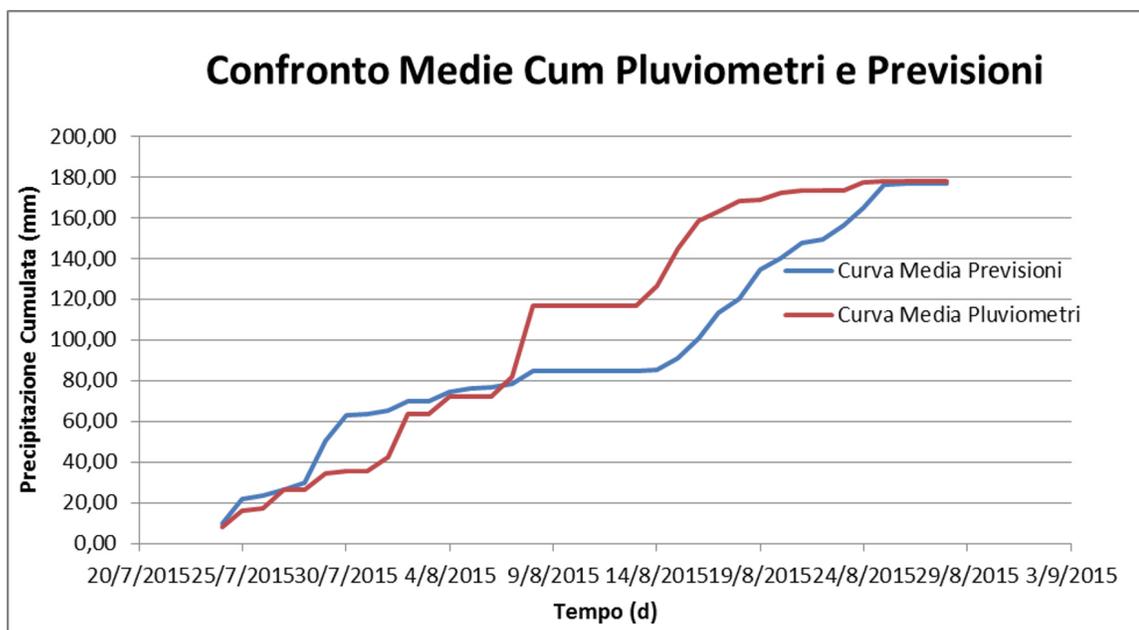


Figura 6.8: Cumulata dei valori medi delle precipitazioni ai pluviometri e dei valori medi delle precipitazioni previste nei tre giorni precedenti.

Capitolo 7

Conclusioni

L'attività svolta sul campo ha messo in evidenza le difficoltà del monitoraggio in un'area particolarmente attiva per quanto riguarda gli eventi di debris flow e come i fattori che devono essere presi in considerazione siano legati alla complessità dei fenomeni in studio, alla difficoltà di inserire in un ambiente così ostile un sistema di monitoraggio affidabile e anche ad aspetti amministrativo-burocratici.

Ciononostante informazioni rilevanti, per la conoscenza del sito, sono state ottenute soprattutto in occasione dell'evento di colata che si è verificato l'8 agosto. Le informazioni sono state ottenute dalla osservazione del video registrato presso la stazione di valle e dall'elaborazione dei dati di pioggia registrati da due pluviometri posti a valle e a monte del bacino del rio di Acquabona.

Altre elaborazioni sono state effettuate per descrivere alcune forme di fondo che sono state osservate nell'alveo del rio Acquabona nei pressi della stazione di valle, per descrivere fotogrammetricamente, mediante l'uso di una macchina fotografica commerciale, una frana attiva in sponda destra all'interno dell'alveo del rio Acquabona, e per analizzare il possibile utilizzo di un servizio meteo disponibile in internet, per la programmazione di interventi sul posto (ottenendo risposte sostanzialmente negative).

L'attività svolta in laboratorio, in collaborazione con lo studente Davide Bronca, ha permesso di applicare i metodi della fotogrammetria terrestre (utilizzati poi anche sul campo) in forma dinamica allo studio di alcuni aspetti del moto degli ammassi granulari secchi.

Elaborazioni specifiche, tra le molte possibili, sono state eseguite per descrivere l'andamento dei volumi occupati dall'ammasso durante il suo moto. I parametri fisici dei materiali granulari utilizzati sono stati determinati sperimentalmente per permettere l'utilizzo dei dati di laboratorio come dati di taratura di modelli matematico-numeric.

Malgrado la diversità nella reologia tra i fenomeni trifasici, quali sono classificabili le colate di detriti di Acquabona, e i fenomeni bifasici generati in laboratorio, il confronto ha messo in evidenza vari aspetti comuni:

la distribuzione della velocità trasversale tende ad assumere valori massimi nella zona centrale del flusso, sia nelle prove su pendio aperto che nelle prove incanalate; durante il moto si verifica una ridistribuzione granulometrica che porta i diametri maggiori in superficie e sul fronte dell'ammasso in movimento (nelle prove sperimentali questo è visibile anche con materiale di densità maggiore).

Diverse sono, invece, le modalità di deposizione del materiale trifasico, le colate di detriti, che presenta forme lobate di maggiore profondità sul fronte del deposito, mentre il materiale bifasico forma accumuli di maggiore profondità in coda al deposito, ben visibili in laboratorio [14].

Alcune prove sperimentali realizzate mescolando materiali caratterizzati da coefficienti di attrito sul fondo molto diversi e da diametri molto diversi hanno messo in evidenza la sensibilità della dinamica del moto alla componente più sottile anche quando questa è presente in frazione minimale.

Bibliografia

- [1] Lazzarini E., Rilievo ed interpretazione di alcuni parametri geomorfologici dell'area da colate detritiche del Rio Acquabona (Alpi Orientali, BL, Italia), 2014, Tesi di Laurea Magistrale in Geologia e Geologia Tecnica, Padova;
- [2] Tancon F., Rilievo ed interpretazione di alcuni parametri geomorfologici dell'area da colate detritiche del Rio Acquabona (Alpi Orientali, BL, Italia), 2014, Tesi di Laurea Magistrale in Geologia e Geologia Tecnica, Padova;
- [3] Carta Geologica D'Italia 1:50.000, Foglio 29, Cortina d'Ampezzo, www.isprambiente.it;
- [4] Scotton P., Genevois R., Moro F., Zorzi L., Girardi G., Praticelli N., The new debris-flows monitoring system of Acquabona torrent (Cortina D'Ampezzo, BL, Italy), 2011, Dipartimento di Geoscienze, Università di Padova;
- [5] Dalla Valle D., Flussi granulari in laboratorio e sul campo: rilievo 3-dimensionale dinamico mediante tecniche fotogrammetriche terrestri, 2014, Tesi di Dottorato in Scienze della Terra, Padova;
- [6] Giudici P., 2003, Data Mining, metodi informatici, statistici e applicazioni, seconda edizione, McGraw-Hill, Milano;
- [7] Amadesi E., Manuale di fotointerpretazione con elementi di fotogrammetria, Pitagora, Bologna;
- [8] Selvini A., 1994, Elementi di fotogrammetria, CittaStudi ;
- [9] Wolf P. R., Elements of Photogrammetry, 1983, McGraw-Hill, Inc., NY;
- [10] of Civil Engineers U.S. Army Corps of Engineers Staff A. e S., 1996, Photogrammetric Mapping, Asce Publications, estratto da: <http://books.google.it/books>;

- [11] User Manual for Australis, 2011, Version 7.2, Photometrix, Australia, www.photometrix.com.au;
- [12] Whipple X. K., C.N.R.-M.I.T. short course: Debris flow process and hazards, Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA;
- [13] Ferro V., La Sistemazione dei bacini idrografici, 2002, McGraw-Hill;
- [14] Iverson R. M., The physics of debris flows, 1997, U. S. Geological Survey, Cascades Volcano Observatory, Vancouver, WA;
- [15] Brigham O. E., The fast Fourier transform, 1974, Engelwood Cliffs, Prentice Hall, Inc., NJ;
- [16] Getting started with ScientificWorkplace, 2005, Version 5, MacKichan Software Inc;