

POLITECNICO DI TORINO



Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

**REALIZZAZIONE DI UN MODELLO FISICO PER LO STUDIO DI
SISTEMI DI MONITORAGGIO PER DEBRIS FLOWS**

Relatore

Prof. Marco Barla

Correlatori

Prof. Roberto Gaudino

Ing. Alessandra Insana

Ing. Yihan Du

Candidato

Daniele Rosi

Marzo, 2020

INDICE

Introduzione	11
1 Generalità sul debris flow	13
1.1 Caratteristiche del flusso	15
1.2 Opere di difesa	18
1.3 Sistemi e dispositivi di monitoraggio.....	23
1.4 Warning system: casi studio.....	31
1.4.1 Il caso del torrente Illgraben	31
1.4.1.1 Confronto con altri siti.....	35
1.5 La fibra ottica come nuova alternativa di monitoraggio	41
1.5.1 Sistema basato sull'analisi della polarizzazione della luce	43
1.5.1.1 Luce polarizzata e parametri di Stokes.....	44
1.5.1.2 Principio di funzionamento	47
2 Casi studio in laboratorio.....	48
2.1 Analisi delle caratteristiche del flusso e del deposito	48
2.1.1 Configurazione del test	48
2.1.2 Risultati.....	49
2.2 Analisi del comportamento in presenza di ostacoli.....	51
2.2.1 Configurazione del test	51
2.2.2 Risultati.....	53
2.3 Analisi di un flusso granulare asciutto	54
2.3.1 Configurazione del test	54
2.3.2 Modellazione numerica.....	56
2.3.3 Forza d'impatto.....	59
3 Modellazione numerica	61
3.1 Metodo agli elementi discreti.....	62

3.1.1	Il DEM particellare	63
4	Realizzazione del modello fisico a scala di laboratorio	65
5	Sperimentazione in laboratorio	73
5.1	Set-up dell'esperimento	73
5.2	Analisi dei dati derivanti delle simulazioni.....	76
5.2.1	Provino cilindrico in gomma	76
5.2.2	Provino cilindrico in teflon.....	80
5.2.3	Provino cilindrico cavo in metallo.....	85
5.2.4	Provino cilindrico in metallo	90
5.3	Sintesi dei risultati.....	92
5.4	Confronto delle registrazioni con analisi video	93
5.5	Nuova configurazione delle simulazioni.....	100
6	Analisi e modellazione numerica degli esperimenti.....	102
6.1	Codice di calcolo nel software PFC ^{2D}	102
6.2	Risultati dell'analisi numerica.....	104
6.2.1	Provino cilindrico in teflon.....	104
6.2.2	Provino cilindrico cavo in metallo.....	108
6.3	Analisi predittiva del comportamento di più oggetti dello stesso materiale ..	110
7	Conclusioni	115
	Bibliografia	117

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Zone interessate dal debris flow [5]	14
Figura 2: Pendenze e distinzione delle diverse zone secondo VanDine (1996)	15
Figura 3: Debris flow, a sinistra rappresentazione di Pierson & Costa (1987), a destra quella di Bardou (2003)	16
Figura 4: Schema degli interventi strutturali per colate detritiche [13]	20
Figura 5: Esempi di briglie di consolidamento [14]	21
Figura 6: Esempio di briglia frangicolata [15]	22
Figura 7: Tipologie di briglie filtranti [15]	23
Figura 8: Schema di monitoraggio Warning System [16]	24
Figura 9: Tracce lasciate dal debris flow sulla vegetazione [10]	25
Figura 10: Wires sensors [10]	26
Figura 11: Sensori ad ultrasuoni [16]	27
Figura 12: Schema del sensore di velocità [10]	28
Figura 13: Funzioni e Performance dei vari sensori [20]	29
Figura 14: Parametri dei vari sensori [20]	30
Figura 15: Bacino idrografico del torrente Illgraben	31
Figura 16: Panoramica del bacino idrografico del torrente Illgraben che mostra le principali posizioni degli elementi che costituiscono il sistema di allarme [21]	33
Figura 17: a) Chalk Cliffs (USA); b) Ergou (Cina); c) Gadoria (Italia); d) Illgraben (Svizzera); e) Kamikamihori (Giappone); f) Lattenbach (Austria); g) Réal (Francia); h) Rebaixader (Spagna); i) Shenmu (Taiwan) [22]	36
Figura 18: Sensore distribuito a fibra ottica (DOFS)	41
Figura 19: Struttura della fibra ottica [27]	42
Figura 20: Single Mode Fiber e Multi Mode Fiber [28]	42
Figura 21: Rappresentazione dell'ellisse di polarizzazione (a) e della sfera in cui i parametri di Stokes costituiscono gli assi cartesiani [25]	45
Figura 22: Esempio di movimento del punto rappresentativo dello stato di polarizzazione sulla superficie della sfera di Poincarè [31]	46
Figura 23: Esempio di parametri di Stokes, spostamenti e velocità angolare	47

Figura 24: Diagramma schematico (A) e foto (B) del canale sperimentale [32].....	49
Figura 25: Distribuzione spaziale del deposito in funzione della miscela e della pendenza del canale [32].....	50
Figura 26: Relazione tra la velocità del flusso e l'estensione del deposito [32].....	50
Figura 27: Diagrammi schematici della struttura sperimentale [33]	51
Figura 28: Forme e spaziatura degli ostacoli [33]	52
Figura 29: Curva granulometrica del materiale [33]	52
Figura 30: Relazione tra densità e riduzione della velocità per diverse forme degli ostacoli [33]	53
Figura 31: (a) Sezione longitudinale del canale; (b) Configurazione geometrica [34] .	55
Figura 32: Sfere bianche di riferimento sulla superficie della sabbia [34].....	55
Figura 33: Distribuzione granulometrica della sabbia del Ticino [34].....	56
Figura 34: Configurazione di prova triassiale in PFC ^{2D} e involuppo di rottura [34]	57
Figura 35: Comparazione tra il modello fisico e quello numerico alla fine del test [34]	57
Figura 36: Configurazione geometrica iniziale del modello fisico (a) e di quello numerico (b); sequenza della configurazione geometrica dopo 0.1s (c), 0.5s (d) e 1s (e) dall'innesco [34].....	58
Figura 37: Ostacolo (a) in alluminio e (b) in legno [34].....	60
Figura 38: Forza d'impatto vs. tempo (a) per differenti valori di densità relativa e (b) in funzione della forma dell'ostacolo [35]	60
Figura 39: Fasi di calcolo con approccio esplicito [36].....	63
Figura 40: Configurazioni geometriche del canale: lineare e a doppia pendenza	66
Figura 41: Struttura a strati del pannello in multistrato fenolico.....	66
Figura 42: Sistema di cerniere	66
Figura 43: Schema dei pannelli uniti mediante sistema di cerniere (misure in cm).....	67
Figura 44: Schema delle sponde in plexiglass (misure in cm)	68
Figura 45: Sponda in plexiglass.....	68
Figura 46: Schema e foto del cuneo in plexiglass (misure in cm).....	68
Figura 47: Schema della sponda in configurazione lineare (misure in cm)	69
Figura 48: Squadretta angolare per il fissaggio delle sponde	69
Figura 49: Struttura a tubi innocenti per il sostegno del canale	70

Figura 50: Travetti appoggiato sulla struttura a tubi innocenti (a sinistra) i e sul parapetto (a destra)	71
Figura 51: Schema di disposizione dei travetti (misure in mm).....	71
Figura 52: Canale assemblato e posizionato.....	72
Figura 53: Schema della disposizione della fibra ottica (in giallo)	74
Figura 54: Disposizione della fibra fissata in tre sezioni trasversali	74
Figura 55: Schematizzazione dei test effettuati	75
Figura 56: Analizzatore di polarizzazione Novoptel PM1000 [31].....	76
Figura 57: Parametri di Stokes e velocità angolare della simulazione con provino in gomma	77
Figura 58: Coordinate del picco di velocità angolare nella simulazione con provino in gomma	78
Figura 59: Dettaglio dei parametri di Stokes al tempo di 0.87 s nella simulazione con provino in gomma.....	78
Figura 60: Coordinate dei picchi principali della velocità angolare nella simulazione con provino in gomma.....	79
Figura 61: Dettaglio dei parametri di Stokes s_2 e s_3 in corrispondenza dei picchi principali della velocità angolare (tempi 0.58 s, 0.71 s e 0.87s) nella simulazione con provino in gomma	79
Figura 62: Parametri di Stokes e velocità angolare nella prima simulazione con provino in teflon.....	81
Figura 63: Coordinate dei picchi di velocità angolare nella prima simulazione con provino in teflon.....	81
Figura 64: Dettaglio dei parametri di Stokes in corrispondenza dei picchi di velocità angolare (tempi 0.91 s e 1.11 s) nella prima simulazione con provino in teflon.....	82
Figura 65: Confronto tra la variazione del parametro di Stokes s_3 dovuta al passaggio del provino e l'ampiezza massima della variazione dovuta alle oscillazioni della fibra non fissata al canale nella prima simulazione con provino in teflon	83
Figura 66: Parametri di Stokes e velocità angolare della seconda simulazione con provino in teflon.....	84
Figura 67: Parametri di Stokes e velocità angolare della terza simulazione con provino in teflon.....	84

Figura 68: Velocità angolare della prima simulazione con il provino cavo in metallo .	86
Figura 69: Parametri di Stokes della seconda simulazione con il provino cavo in metallo	86
Figura 70: Velocità angolare della seconda simulazione con provino cavo in metallo.	88
Figura 71: Parametri di Stokes della seconda simulazione con provino cavo in metallo	88
Figura 72: Velocità angolare della terza simulazione con provino cavo in metallo.....	89
Figura 73: Parametri di Stokes della terza simulazione con provino cavo in metallo...	89
Figura 74: Velocità angolare della simulazione con provino in metallo	91
Figura 75: Parametri di Stokes della simulazione con provino in metallo	91
Figura 76: Segnale di allarme nella simulazione con provino in metallo.....	92
Figura 77: Fotogrammi rappresentativi della simulazione con timecode e numero del fotogramma in sovrapposizione (provino cavo in metallo)	96
Figura 78: Fotogrammi rappresentativi della simulazione con timecode e numero del fotogramma in sovrapposizione (provino in teflon)	98
Figura 79: Parametri di Stokes della simulazione con provino in gomma (nuova configurazione)	101
Figura 80: Velocità angolare nella simulazione con provino in gomma (nuova configurazione)	101
Figura 81: Modello del problema in PFC ^{2D} [37]	103
Figura 82: Spostamenti del provino in teflon con attrito pari 0.8.....	105
Figura 83: Spostamenti del provino in teflon con attrito pari 0.4.....	105
Figura 84: Spostamenti del provino in teflon con attrito pari 0.2.....	106
Figura 85: Spostamenti del provino in teflon con attrito pari 0.1	107
Figura 86: Velocità del provino in teflon con attrito pari 0.1	107
Figura 87: Spostamenti del provino cavo in metallo con attrito pari 0.8	108
Figura 88: Spostamenti del provino cavo in metallo con attrito pari 0.4	109
Figura 89: Spostamenti del provino cavo in metallo con attrito pari 0.2	109
Figura 90: Velocità del provino cavo in metallo con attrito pari 0.2.....	110
Figura 91: Modello dell'analisi numerica con tre elementi in PFC ^{2D}	111
Figura 92: Modello dell'analisi numerica con cinque elementi in PFC ^{2D}	111
Figura 93: Velocità in funzione del tempo nella simulazione con tre elementi	112

Figura 94: Spostamenti in funzione del tempo nella simulazione con tre elementi	113
Figura 95: Velocità in funzione del tempo nella simulazione con cinque elementi....	113
Figura 96: Spostamenti in funzione del tempo nella simulazione con cinque elementi	114

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1: Vantaggi e Svantaggi dei sensori più comuni [16].....	30
Tabella 2: Caratteristiche generali dei nove siti in esame [22].....	39
Tabella 3: Tipo e numero di sensori utilizzati per ogni sito [22].....	40
Tabella 4: Informazioni relative ai sensori [22].....	40
Tabella 5: Caratteristiche del provino in gomma.....	76
Tabella 6: Caratteristiche del provino in teflon	80
Tabella 7: Caratteristiche del provino cavo in metallo	85
Tabella 8: Caratteristiche del provino in metallo.....	90
Tabella 9: Tempi corrispondenti ai picchi di velocità angolare nella prima simulazione con provino cavo in metallo.....	93
Tabella 10: Differenze in termini di tempo tra due picchi successivi della velocità angolare della prima simulazione con provino cavo in metallo	94
Tabella 11: Tempi corrispondenti ai picchi di velocità angolare nella seconda simulazione con provino cavo in metallo	94
Tabella 12: Differenze in termini di tempo tra due picchi successivi della velocità angolare della seconda simulazione con provino cavo in metallo.....	94
Tabella 13: Numero identificativo dei fotogrammi (provino cavo in metallo)	97
Tabella 14: Numero di fotogrammi che intercorrono tra due fotogrammi successivi (provino cavo in metallo).....	97
Tabella 15: Tempi che intercorrono tra il passaggio del provino in due sezioni successive derivanti dall'analisi video (provino cavo in metallo).....	97
Tabella 16: Numero identificativo dei fotogrammi (provino in teflon).....	99
Tabella 17: Numero di fotogrammi che intercorrono tra due fotogrammi successivi (provino in teflon).....	99
Tabella 18: Tempi che intercorrono tra il passaggio del provino in due sezioni successive derivanti dall'analisi video (provino in teflon).....	99
Tabella 19: Tempi di passaggio nelle sezioni di interesse ricavati dalle due analisi numeriche.....	114

INTRODUZIONE

Le colate detritiche, o *debris flows*, rappresentano uno dei fenomeni franosi più pericolosi negli ambienti montani. Il loro potere distruttivo, a causa della loro grande massa composta da detriti e acqua, della loro elevata velocità e forza di impatto, è in grado di provocare danni ad edifici ed infrastrutture, mettendo a repentaglio l'incolumità e la vita di esseri umani. Un adeguato sistema di monitoraggio costituisce quindi un elemento molto importante per la protezione delle aree a rischio. Infatti, il monitoraggio non ha soltanto lo scopo di migliorare la nostra conoscenza del fenomeno, ma permette di sviluppare un vero e proprio sistema di allarme.

Con lo scopo di testare la potenzialità della fibra ottica come sensore per il monitoraggio di debris flows, è stata avviata una campagna sperimentale presso il Laboratorio Geotecnico del Politecnico di Torino. Il presente studio ha lo scopo di illustrare le fasi che hanno portato all'ideazione e alla costruzione di un modello fisico a scala di laboratorio per simulazioni di debris flows e analizzare i dati derivanti da esperimenti sistematici che coinvolgono il movimento e il rotolamento di oggetti rigidi di diverse dimensioni all'interno del canale.

Il Capitolo 1 mira a descrivere il fenomeno delle colate detritiche sotto tutti i suoi aspetti, dalle cause del suo innesco alle caratteristiche del flusso in movimento e del deposito di materiale. Di seguito, vengono poi elencati i principali interventi strutturali che possono essere impiegati per la stabilizzazione del corpo di frana o per il controllo del movimento del fenomeno in atto. Per concludere vengono esposti sistemi e dispositivi per il monitoraggio di tale fenomeno, rivolgendo in particolar modo l'attenzione sui sistemi di allarme e il funzionamento della fibra ottica.

Nel Capitolo 2 vengono riportati tre casi studio nei quali si è realizzato un modello fisico a scala di laboratorio per simulazioni di debris flows. Per ogni caso viene descritta la metodologia dei test effettuati e i rispettivi risultati ottenuti.

Il Capitolo 3 descrive i metodi di analisi numerica che possono essere adottati per la risoluzione di un problema geotecnico, andando ad approfondire le fasi di calcolo del

Metodo agli Elementi Discreti (DEM) con schematizzazione particellare degli elementi del dominio.

Nel Capitolo 4 viene svolta un'attenta descrizione delle componenti del modello fisico a scala di laboratorio per la simulazione di debris flow ideato e progettato nell'ambito del presente studio. Sono inoltre descritte tutte le fasi che hanno portato alla sua realizzazione.

Nel Capitolo 5 viene descritta la sperimentazione in laboratorio e le modalità con cui si sono svolte le varie simulazioni. I dati registrati vengono poi analizzati in dettaglio per ognuno dei test effettuati.

Infine, nel Capitolo 6, viene effettuata un'analisi numerica delle simulazioni fisiche in scala.

1 GENERALITÀ SUL DEBRIS FLOW

Il termine debris flow indica un rapido movimento verso valle, indotto dalla gravità, di un corpo composto da materiale detritico ed acqua, intermedio tra una frana ed un flusso d'acqua con caratteristiche meccaniche differenti da entrambi i fenomeni. Una descrizione qualitativa di come si sviluppa questo fenomeno è stata ben espressa dagli autori Johnson & Rodine: “Un muro di massi, rocce di tutte le dimensioni e fango improvvisamente appare nel canale di un torrente, preceduto da fragorosi boati. Appena il muro passa, il canale rimane colmo di fango carico di detriti che si urtano e fanno rumore tra di loro. Il flusso di detriti travolge strutture e macchine che si trovano lungo il suo percorso, ricoprendo strade, campi e pascoli con un manto di melma che lentamente inizia a fermarsi e i detriti si diffondono su di una superficie a forma di lobo con margini molto ripidi” [1]. I requisiti fondamentali per far innescare questo fenomeno sono la presenza di un elevato numero di detriti instabili provenienti dall'erosione dei versanti oppure dalla deposizione di materiale derivante da un evento franoso, ed una sorgente d'acqua che deriva da vari fattori ambientali, come piogge o scioglimento delle nevi. Entrambi questi fattori sono di principale importanza nel valutare il rischio di debris flow; in un dato bacino un piccolo temporale potrebbe innescare la colata detritica, ma un evento più violento che avviene in un secondo momento potrebbe produrre soltanto inondazioni improvvise se non sono presenti detriti superficiali. Tali condizioni sono tipiche di zone montuose che si trovano in regioni aride, semiaride, artiche o umide [2]. Un debris flow si origina lungo pendii ripidi e la sua mobilitazione è definita come il processo per il quale la colata si sviluppa a partire da una situazione statica iniziale di una massa rigida costituita da terreno, sedimenti e rocce. L'innescò richiede una quantità sufficiente di acqua a saturare il terreno, incrementando la pressione interstiziale ed aumentando così la probabilità di occorrenza del fenomeno [3]. L'aumento di pressione interstiziale causa a sua volta una diminuzione della resistenza a taglio portando ad una perdita di coesione tra le particelle ed una trasformazione di una massa rigida in un fluido viscoso. Questa trasformazione cambia la resistenza nei confronti del moto verso valle, da una resistenza allo scorrimento dell'iniziale massa rigida (deposito di detriti) ad una resistenza dovuta alla viscosità del fluido, determinando una rapida accelerazione della

colata detritica che può raggiungere alte velocità lungo il versante. Il debris flow solitamente segue percorsi preesistenti, ma può muoversi verso valle in qualunque direzione a causa della sua potenza erosiva che gli permette di scavare il proprio canale e formare nuovi argini. Al diminuire della pendenza, la colata perde energia cinetica fino a fermarsi, formando accumuli di detriti di dieci o più metri di altezza. Le acque meteoriche che defluiscono incontrano queste dighe di detriti, si infiltrano nel materiale e mobilitano di nuovo i sedimenti originando una nuova colata. Questo fenomeno prende il nome di *avalanching, damming and debris flow formation* [2]. Il percorso interessato dal debris flow può essere essenzialmente diviso in tre zone distinte: la zona di innesco o triggering, la zona intermedia detta zona di propagazione o trasporto e l'area di deposito (**Figura 1**). Secondo la divisione di VanDine [4], l'innesco richiede una pendenza maggiore di 25° ed in questa zona prevale l'erosione, mentre la vegetazione è scarsa o del tutto assente.

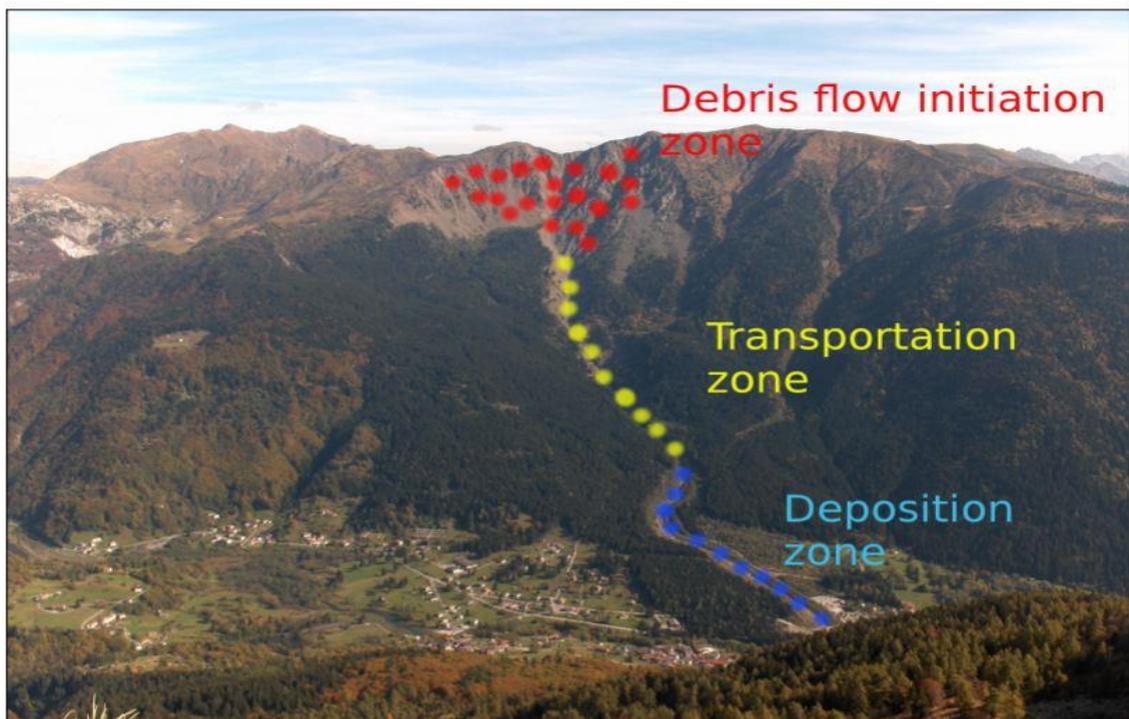


Figura 1: Zone interessate dal debris flow [5]

Nella zona di propagazione le pendenze rimangono piuttosto elevate ($>15^\circ$) e così si verifica una continua erosione del fondo e delle sponde con un accrescimento del volume fino a dieci volte superiore al volume iniziale. Infine nella zona più a valle la diminuzione

di pendenza ($<10^\circ$) e la perdita di confinamento portano ad una graduale deposizione dei detriti (Figura 2).

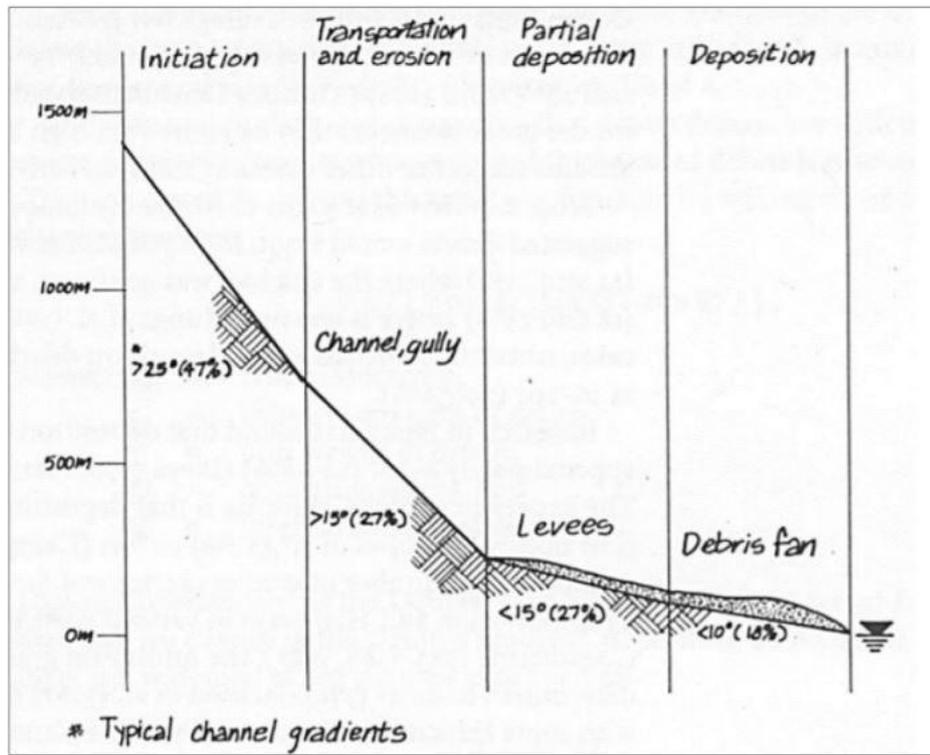


Figura 2: Pendenze e distinzione delle diverse zone secondo VanDine (1996)

1.1 CARATTERISTICHE DEL FLUSSO

Andando ad analizzare in dettaglio si osserva come il debris flow si presenta come una serie di ondate successive non stazionarie e non uniformi, determinate dal temporaneo sbarramento (damming) e sfondamento dei detriti. Il periodo che intercorre tra due ondate successive può quindi variare da pochi secondi a diverse ore. La prima parte che si presenta è una miscela fluida detta "precursory surge" che anticipa il fronte vero e proprio. Il fronte d'onda è solitamente la parte più alta e trasporta i detriti più grandi che la colata incontra lungo il suo percorso, come massi ed alberi abbattuti. Di seguito si verifica un graduale assottigliamento fino a formare un flusso fangoso, più liquido e turbolento, con un'elevata concentrazione di sedimenti sospesi, ma senza massi (Figura 3).

I detriti trasportati nella testa dell'onda, essendo molto grandi, tendono ad affondare, ma in realtà rimangono sospesi e sembrano quasi galleggiare. Questo fenomeno può essere

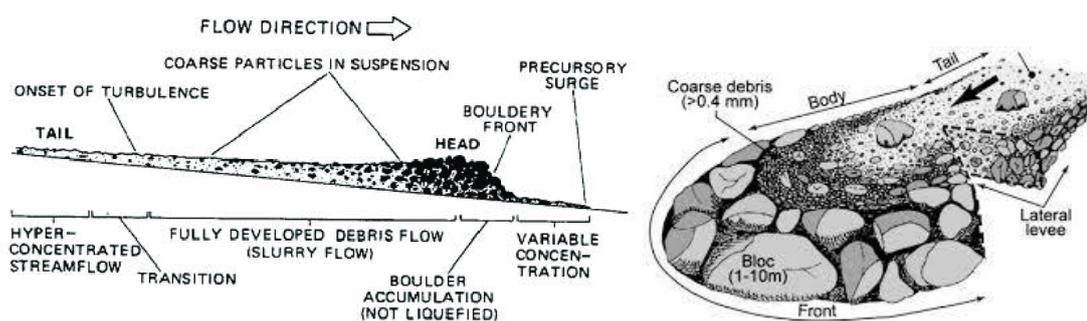


Figura 3: Debris flow, a sinistra rappresentazione di Pierson & Costa (1987), a destra quella di Bardou (2003)

definito secondo cinque diversi meccanismi. Il primo è la coesione, dovuta alla percentuale di limo e argilla presente nei detriti, che solitamente si attesta al di sotto del 10% ed è quindi in grado di sostenere soltanto le particelle di sabbia e ghiaia che costituiscono la maggior parte della massa del debris flow. Pertanto particelle più grandi di queste devono essere supportate da altre forze. Il secondo meccanismo che agisce unitamente alla coesione è la forza di galleggiamento, la quale è determinata dalla differenza di densità del solido immerso e quella del fluido. Questo fenomeno è rafforzato da un incremento di pressione interstiziale causato dal parziale trasferimento del peso delle particelle solide al fluido. Da un altro punto di vista questo però provoca una riduzione della resistenza a taglio e quindi aumenta la mobilità della colata. Il terzo fenomeno è un meccanismo di dispersione (dispersive pressure) ed è stato dimostrato sperimentalmente da Bagnold [6]: quando una grande quantità di detriti scarsamente ordinati viene investita da un flusso, le particelle più grandi tendono a spostarsi verso la superficie libera a causa della collisione tra di esse. La dispersive pressure di una particella incrementa con il quadrato del suo diametro, perciò essa agisce maggiormente sulle particelle più grandi, allontanandole dal fondo del canale che risulta essere la zona di massimo taglio. Il quarto meccanismo è dovuto alla turbolenza, cioè la variazione nel tempo, in direzione ed intensità, della velocità. L'efficacia della turbolenza nei debris flow è discutibile, in quanto l'alta viscosità e la coesione tendono a rendere il moto laminare. Il quinto ed ultimo meccanismo è dovuto ad un supporto strutturale che si crea da un'intelaiatura di particelle in contatto tra di loro e con il letto del canale. Per ogni flusso si può definire una soglia di frazione solida, detta percolazione, oltre la quale si verifica un'interazione continua tra le particelle. Se la frazione solida è minore di questa

soglia, le particelle più grandi, tenderanno ad andare verso il basso e rimanere vicino al fondo. Considerando che la distribuzione granulometrica e la frazione solida variano gradualmente a causa dell'erosione del fondo, degli argini e alla deposizione laterale di materiale, questa intelaiatura contribuisce maggiormente alla sospensione dei massi in condizioni statiche, ovvero nei depositi di detriti; mentre in condizioni dinamiche il suo contributo sarà minore e la sospensione è garantita dalla dispersive pressure, dalla coesione e dalla forza di galleggiamento [2, 3]. Per di più quando la frazione solida raggiunge questo valore critico, abbiamo a che fare con un mezzo monofase. Infatti il debris flow essendo composto da una miscela di acqua e detriti, in prima approssimazione, può essere considerato come un fluido viscoso monofase [7], con valori tipici di viscosità che variano da 1 a $8 \cdot 10^3$ Poise, in confronto all'acqua a 20 °C che assume un valore di 0.01 Poise [2]. In realtà il debris flow mostra entrambe le proprietà di un fluido viscoso e di un solido plastico. Johnson [1, 8, 9] adotta il modo più semplice per combinare le proprietà plastiche e viscosi, descrivendo un modello di un materiale monofase che rimane rigido o elastico finché le tensioni deviatoriche non superano una certa soglia. Quando le tensioni superano la resistenza a snervamento il materiale si comporta come un fluido viscoso [3]. La determinazione diretta del comportamento del materiale con l'utilizzo di reometri deve far fronte all'inevitabile problema della presenza di particelle di diverse dimensioni, inclusi i grandi massi. I reometri rotazionali usati in laboratorio possono testare circa 1 cm³ di materiale. In ogni caso se la particella più grande avesse il diametro di 1 metro, un appropriato reometro dovrebbe avere un diametro di 120 metri. È necessario quindi derivare, estrapolare o stimare il comportamento reologico dell'intera massa attraverso metodi indiretti [7]. La densità è un parametro principale per il controllo del comportamento reologico del flusso. Con l'incremento della concentrazione dei sedimenti, le proprietà del flusso iniziano a cambiare, la velocità di sedimentazione delle particelle diminuisce e la densità aumenta. In una colata detritica i solidi possono arrivare a costituire fino al 90% della massa totale, mentre l'acqua può essere presente in piccole percentuali, in questo modo la densità si attesta generalmente intorno a valori di 1.80 – 2.30 g/cm³ [10]. La velocità che il debris flow riesce a raggiungere dipende da tutti questi parametri ed in particolar modo dalle caratteristiche dei detriti, dalla loro concentrazione e dalla loro dimensione, dalle caratteristiche geometriche del canale, come forma, pendenza, larghezza e sinuosità. La capacità motoria

del debris flow e la sua abilità di percorrere grandi distanze, è altamente dipendente dalla presenza di argilla, la quale riduce la permeabilità, incrementa la pressione interstiziale e di conseguenza la mobilità del flusso. I valori osservati e raccolti in letteratura indicano velocità che variano da 0.5 m/s a circa 20 m/s [2]. Inoltre un'alta concentrazione di sedimenti contribuisce all'aumento della resistenza totale a taglio del flusso; le particelle fini producono coesione e quelle grossolane sviluppano attrito interno. La resistenza totale a taglio T di un fluido in un canale può essere espressa secondo la seguente relazione:

$$T = qgRS$$

dove q rappresenta la densità del flusso, g l'accelerazione di gravità, R il raggio idraulico (approssimativamente la media della profondità del flusso in canali ampi) ed S l'attrito. Johnson [9] [11] ha elaborato tre modi per stimare la resistenza a taglio per un debris flow dopo che esso si è arrestato ed ha formato il deposito. Il primo metodo utilizza lo spessore del deposito laterale, il secondo le dimensioni e la geometria del canale scavato dalla colata ed infine il terzo si basa sulle dimensioni dei massi più grandi depositati.

I fluidi tendono a fermarsi una volta che raggiungono aree a bassa pendenza, più in dettaglio nelle zone dove la tensione interna di taglio è superata dalla resistenza di taglio del flusso. Come già visto i massi più grandi tendono a rimanere sospesi nella parte frontale dell'onda e durante la discesa verso valle si spostano verso i margini, formando evidenti argini creando una sorta di diga che impedisce e blocca il moto dei detriti più fini. La deposizione e la diffusione laterale della colata detritica giocano un ruolo importante poiché permettono allo spessore del flusso di diminuire fino al di sotto del valore necessario per fluire. Inoltre, l'arresto è favorito dalla diminuzione di acqua nei pori che causa un aumento dell'attrito interno tra le particelle [2, 3].

1.2 OPERE DI DIFESA

Durante il suo percorso il debris flow esercita un'enorme forza d'impatto sugli oggetti che incontra, come ponti, pali, muri di sostegno, edifici e così via, causando danni considerevoli quando riesce a raggiungere le zone abitate. Anche la vegetazione viene completamente rimossa al passaggio della colata, gli alberi vengono recisi soltanto pochi

centimetri al di sopra del livello del terreno. I danni maggiori si verificano nella parte centrale del flusso e diminuiscono verso i margini, zone dove la vegetazione non necessariamente viene recisa grazie alle basse velocità raggiunte. Le basse velocità ai margini del flusso sono messe in evidenza dalla presenza di massi di grandi dimensioni intorno agli alberi che si trovano lungo il canale ed a evidenti graffi sulla loro corteccia. L'entità della forza d'impatto che il flusso esercita sugli oggetti che incontra può essere valutata secondo la formula proposta da Watanabe & Ikya [12]:

$$P = a \left(\frac{\gamma \cdot v^2}{g} \right)$$

dove P è la pressione d'impatto, a è un coefficiente che dipende dal moto del flusso (pari a 2 per un moto laminare), γ è il peso specifico, v la velocità media e g l'accelerazione di gravità. Essendo questa forza proporzionale al peso specifico e al quadrato della velocità del flusso, si possono registrare valori che raggiungono diverse migliaia di Newton per metro quadrato [2]. Per questo si evince che la costruzione di barriere protettive è necessaria se non è possibile eliminare il rischio di debris flow. Gli interventi strutturali si dividono in due categorie:

- OPERE ATTIVE: volte alla stabilizzazione del corpo di frana prima che esso si mobiliti;
- OPERE PASSIVE: volte al controllo dei movimenti del fenomeno in atto.

Lo schema tipo di intervento (**Figura 4**) prevede di non organizzare un'unica grande opera che trattenga tutto il materiale, bensì una successione di opere che interagiscono tra loro e ciascuna di esse ha la capacità di mantenere una porzione di materiale. Nella zona di distacco ed innesco vengono installate opere di consolidamento (opere attive) per evitare l'erosione del terreno e quindi l'accumulo di detriti, mentre più a valle si trovano opere di trattenuta (opere passive) che intervengono sul processo di trasporto e deposito.

La prima opera che può essere realizzata nella zona di innesco sono le soglie di stabilizzazione, opere trasversali inserite nel terreno, in modo da stabilizzare la porzione di terreno facilmente erodibile. Più a valle nel canale di trasporto si trovano le briglie di consolidamento (**Figura 5**), anch'esse opere trasversali realizzate in diversi modi (cemento armato, pietrame non legato, gabbioni o legno) con lo scopo di ridurre

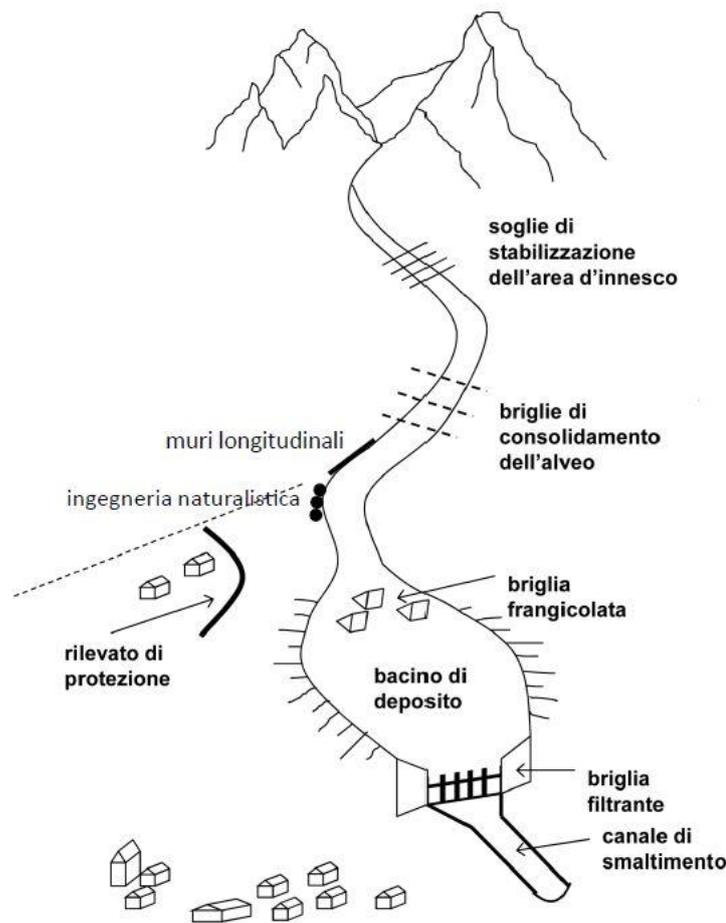


Figura 4: Schema degli interventi strutturali per colate detritiche [13]

l'erosione e l'abbassamento del canale, con conseguente riduzione dell'apporto di materiale dal fondo. Più in particolare queste briglie sono costituite da manufatti trasversali poco alti e sporgenti dal profilo topografico. La riduzione della pendenza del profilo è perciò dovuta alla realizzazione di una gradonatura con materiale di riporto inserito tra due briglie successive. L'intervento sfrutta il principio secondo il quale sotto ad una certa inclinazione del pendio (circa 15°) l'erosione è poco marcata e la colata non si innesca. D'altra parte se l'inclinazione è troppo ridotta, si favorisce il processo di deposizione, alterando la condizione del profilo e rendendo inefficace l'opera. Si impone quindi una pendenza superiore a 5° . Quando la briglia è interessata dal fenomeno, la massa che arriva da monte si muove sul gradone e salta dal manufatto, per riprendere a muoversi sul gradone sottostante. Questo processo può causare problemi se il flusso saltando da monte impatta direttamente sull'opera a valle oppure se la zona di scavo che

si crea a valle del manufatto scalza la fondazione. Per questo nella fase di progettazione deve essere valutata attentamente la distanza tra le briglie e deve essere garantito un minimo di copertura al piede. L'altezza di queste opere varia tra 2.5 m e 7 m. Nella zona di transito sono più alte rispetto alla zona di innesco in modo da sfruttare il salto per ridurre la velocità del fenomeno. In aggiunta di queste strutture si realizzano anche opere longitudinali come muri longitudinali collocati lungo le sponde per evitare l'erosione spondale, impedendo così ulteriore apporto di materiale al flusso e l'allargamento del canale. In alternativa si eseguono opere di ingegneria naturalistica, le quali impiegano piante vive o morte per limitare l'erosione spondale. Muovendosi verso valle le opere non hanno più una funzione di stabilizzazione perché la dinamica del fenomeno è diversa e avviene una fase di progressiva deposizione. Ma se non controllata la deposizione può raggiungere i centri abitati; per evitarlo si realizza un sistema di trattenuta costituito da briglie frangicolata, un bacino di deposito, briglie filtranti e un canale di smaltimento. Le briglie frangicolata (**Figura 6**) sono elementi a pettine aventi la funzione di disturbare il flusso. Questi elementi hanno grande spaziatura e non trattengono il materiale, bensì rompono il flusso, bloccando i massi più grandi e riducendo la velocità della colata.



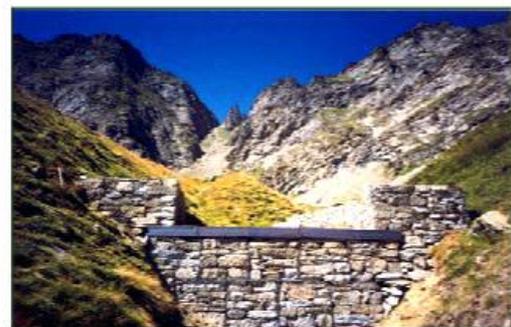
a) Calcestruzzo armato



b) Pietrame non legato



c) Legno



d) Gabbioni

Figura 5: Esempi di briglie di consolidamento [14]



Figura 6: Esempio di briglia frangicolata [15]

L'impatto del flusso su queste opere può essere molto violento e per questo gli elementi sono dei contrafforti in cemento armato. A questo segue il bacino di deposito, predisposto al deposito di almeno una parte di materiale una volta che la velocità è stata ridotta dalle briglie frangicolata. Il bacino è predisposto in funzione della topografia e della morfologia della valle, collocato in corrispondenza di un allargamento naturale del canale. È caratterizzato da una rottura di pendenza tra il canale in ingresso e quello in uscita in modo da consentire la deposizione del materiale. Se l'allargamento non è sufficiente si può realizzare un bacino con più vasche in successione o può essere creato artificialmente mediante la costruzione di sponde di contenimento. Infine nella parte terminale del bacino è posta una briglia filtrante che favorisce il deflusso solo di una percentuale di materiale. Queste opere presentano un filtro costituito da un taglio verticale o più tagli orizzontali con l'obiettivo di trattenere almeno la componente grossolana della colata ed evitare l'ostruzione completa del filtro. In funzione del tipo di fenomeno e di flusso atteso si definiscono diverse tipologie di briglia filtrante, la cui apertura è scelta in modo da rispettare gli obiettivi sopra citati. Le principali tipologie di briglia filtrante (**Figura 7**) sono:

- Briglie a finestra;
- Briglie a fessura;
- Briglie a reticolo;
- Briglie a pettine.

L'ultimo elemento è il canale di smaltimento che deve gestire il materiale che passa attraverso la briglia filtrante e deve garantire il transito di flussi ad alta concentrazione solida fino a convogliarli all'esterno dei centri abitati. Tali canali devono essere progettati in modo da evitare il deposito di materiale che potrebbe creare un tappo e provocare un'erosione, ma allo stesso tempo si deve limitare la velocità per incanalare meglio il flusso in possibili curve a stretto raggio attraverso smorzatori costituiti da piccoli salti idraulici. La sezione deve essere di forma parabolica, semicircolare o ad "U" per garantire una distribuzione uniforme degli sforzi e di conseguenza una minore formazione di depositi. Per lo stesso motivo non si adottano sezioni a spigoli vivi.

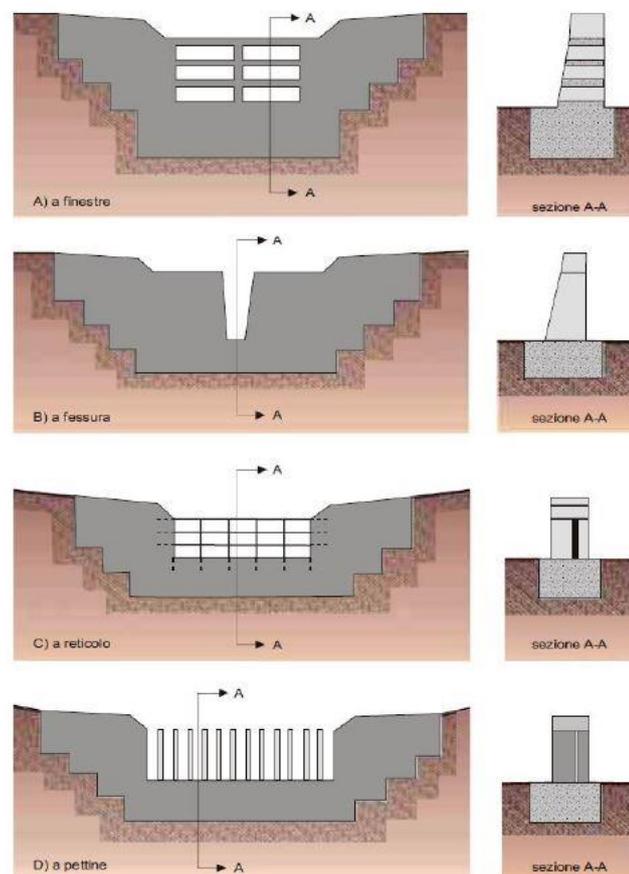


Figura 7: Tipologie di briglie filtranti [15]

1.3 SISTEMI E DISPOSITIVI DI MONITORAGGIO

Gli interventi strutturali devono essere ben integrati con un adeguato sistema di monitoraggio (**Figura 8**) che può essere diviso in due categorie principali: Advance

Warning e Event Warning. Con il termine Advance Warning si intende un sistema basato sul monitoraggio delle condizioni idrometeorologiche, con lo scopo di dare un segnale di pericolo prima che un possibile debris flow si inneschi. Per questo tipo di monitoraggio vengono usate le tipiche tecniche della meteorologia e dell'idrologia, attraverso l'impiego di pluviometri per la misura delle piogge, radar meteorologici e monitoraggio delle portate d'acqua nei canali. Con il termine Event Warning invece si intende la fase in cui si registra il passaggio del debris flow attraverso sensori ad ultrasuoni, sismometri, pendoli, etc. In questa fase è possibile dare un allarme mentre il flusso è in movimento. Per esempio quando un pendolo viene inclinato dal passaggio del flusso viene inviato un segnale che può essere usato come allarme. Sarà quindi necessario un dispositivo che elaborerà i dati ricevuti dal sensore e invierà il segnale a dispositivi di allarme come semafori o sirene. A causa dell'instabilità del terreno in un bacino soggetto a debris flow, un sistema di allarme cablato può essere poco efficiente a causa della probabile rottura dei cavi. Si preferisce quindi realizzare un sistema con connessione wireless tra i vari dispositivi. Inoltre, poiché un singolo sensore può dare falsi allarmi, sarà necessario integrare il sistema con diversi dispositivi di monitoraggio. Un requisito base nella progettazione di tale sistema è il tempo di allarme, cioè il tempo che intercorre tra il segnale di allarme e l'arrivo del debris flow nell'area a rischio. Questo tempo solitamente non eccede i 3-5 minuti, mettendo in evidenza importanti limiti nel suo utilizzo.

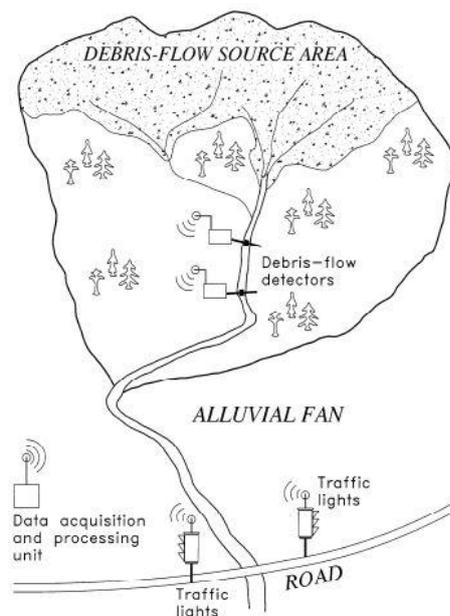


Figura 8: Schema di monitoraggio Warning System [16]

In ogni modo è molto importante per mettere in sicurezza la vie di trasporto fermando il traffico, ma risulta inefficace per proteggere le aree abitate, poiché il tempo di allarme è troppo breve per riuscire ad evacuare l'intera area interessata [16].

Le caratteristiche e le quantità da monitorare in un debris flow sono molto numerose e per ognuna di esse devono essere impiegati diversi sensori. Per esempio il valore di altezza di picco del flusso è difficile da ottenere attraverso misurazioni manuali, come ad esempio indicatori di livello (staff gauges) che sono aste graduate immerse nel fluido e i valori di picco vengono letti da un operatore. La grande capacità erosiva e la presenza di grandi massi nella colata detritica impedisce di fissare in modo sicuro questi strumenti. Lo stesso vale per la misura attraverso crest stage gauges, ovvero strumenti composti da un'asta di legno all'interno di un tubo con un piccolo foro per fare entrare il liquido. All'interno del tubo è presente una piccola quantità di sughero e quando il livello dell'acqua cresce, questo galleggia e aderisce alle pareti interne del tubo in corrispondenza del massimo livello che l'acqua raggiunge. Quindi il metodo più semplice per valutare il livello di picco è andare a valutare le tracce lasciate sulla vegetazione presente lungo il canale (**Figura 9**), facendo attenzione nel differenziarle dagli schizzi della parte fluida [17]. Quando la vegetazione non è presente viene utilizzata una serie di fili tesi a vari livelli (set of wires) sopra il canale (**Figura 10**). Questi fili possono dare un'indicazione sulla massima profondità del flusso, valutando quale sia il filo più in alto



Figura 9: Tracce lasciate dal debris flow sulla vegetazione [10]



Figura 10: Wires sensors [10]

che viene rotto. Oltre al valore massimo, è di estremo interesse conoscere le variazioni di livello in funzione del tempo, ma anche in questo caso a causa della natura distruttiva del debris flow è possibile farlo soltanto attraverso sensori remoti. I più comuni sono i sensori ad ultrasuoni (ultrasonic sensors, **Figura 11**) sospesi al di sopra del canale e integrati con informazioni visive ottenibili da una videocamera. Questi sensori sono anche in grado di misurare il livello di erosione o di accumulo di detriti nel canale. Un secondo utilizzo di questi sensori è quello di posizionarli ad una distanza nota tra di loro lungo il canale per poter determinare la velocità del debris flow. Come già descritto, il debris flow ha generalmente un fronte molto ben definito (onda di testa) e la sua velocità può essere determinata come il rapporto tra la distanza di due sensori successivi e l'intervallo di tempo che intercorre tra le registrazioni del passaggio dell'onda dei medesimi sensori. Immediatamente si capisce come questa soluzione di disporre più dispositivi dello stesso tipo in serie lungo il canale, può essere applicata anche ad altri tipi di sensore. In particolare, facendo riferimento a quelli a già citati, set di fili o sensori di contatto possono essere posizionati in più siti procedendo verso valle. Disporre set di fili è certamente la soluzione più economica, ma essi devono essere reinstallati ad ogni passaggio di un debris flow, mentre i sensori ad ultrasuoni sono quelli che forniscono più informazioni (velocità media, erosione, accumulo), ma devono essere appesi al di sopra del canale e questa operazione può essere difficile. Per ovviare a questo problema i sensori ad ultrasuoni possono essere accoppiati con sensori sismici che necessitano di una adeguata calibrazione per avere misure attendibili, ma anch'essi sono in grado di rilevare il flusso,

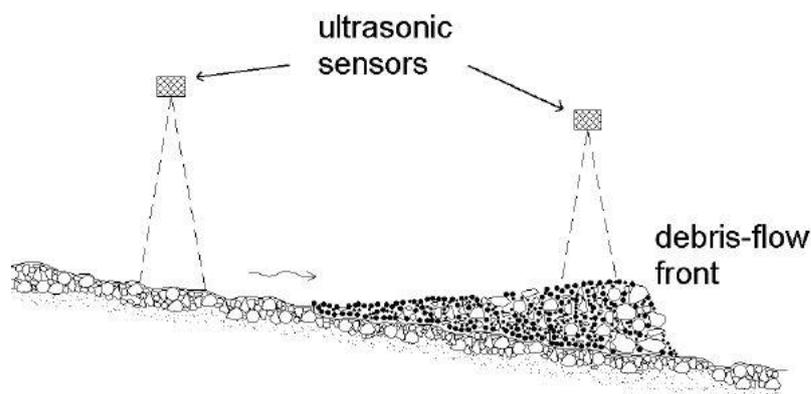


Figura 11: Sensori ad ultrasuoni [16]

il suo passaggio e la velocità dell'onda principale. Si posizioneranno i sensori sismici, che dovranno essere semplicemente interrati, in zone meno accessibili, mentre i sensori ad ultrasuoni verranno installati in zone dove possono essere facilmente appesi sopra il canale. Il fronte principale è solitamente seguito da onde più piccole, che riescono ad essere individuate sia dai sensori ad ultrasuoni che dai sensori sismici, in questo modo è possibile valutare la velocità media dell'intero flusso. In letteratura si possono trovare altri metodi per stimare la velocità superficiale del debris flow. Un esempio può essere la realizzazione di un timelapse, ovvero scattando fotografie ad intervalli regolari, la velocità può essere calcolata valutando la distanza percorsa, in immagini successive, dei massi più grandi che compongono il fronte d'onda. Il limite nell'utilizzo di questa tecnica è che necessita un operatore o un sistema di triggering che attivi la fotocamera a distanza quando il flusso sta per passare sotto di essa. Lo stesso può essere fatto attraverso la registrazione di un video del passaggio del debris flow. Un'altra soluzione può essere l'utilizzo di un sensore di velocità (velocity sensor based on spatial filtering velocimetry, utilizzato da Itakura [18] nella valle di Kamikamihori, **Figura 12**), il quale si basa sull'ipotesi che la configurazione della superficie del flusso rimane invariata nel breve intervallo di tempo nel quale il debris flow passa nel campo visivo del sensore. Questo sensore è composto da una fotocellula e un reticolo con fessure parallele ed il segnale di output che restituisce è un segnale sinusoidale, la cui frequenza principale può essere relazionata, attraverso apposite formule, alla velocità del flusso. Un ultimo strumento utilizzato è il velocimetro elettromagnetico (electromagnetic doppler speedometer), che

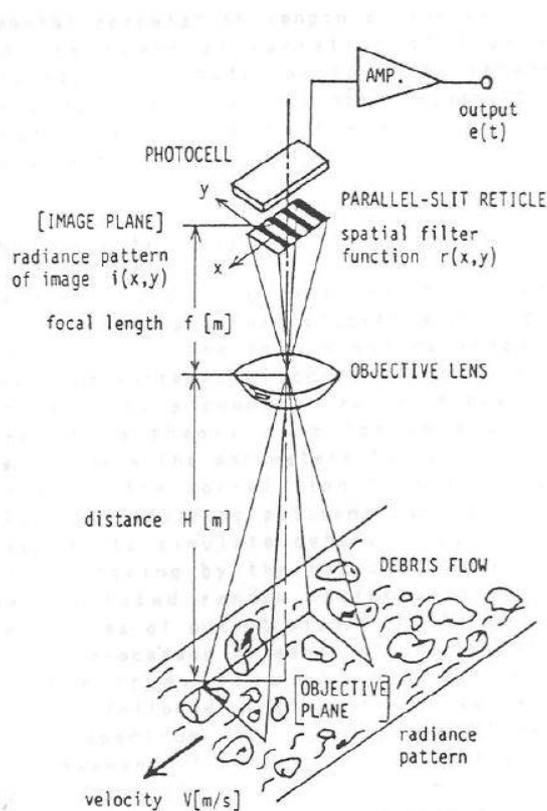


Figura 12: Schema del sensore di velocità [10]

si basa sulla caratteristica delle onde radio di viaggiare lungo un percorso rettilineo, se queste colpiscono un oggetto una porzione dell'onda viene assorbita e un'altra viene riflessa. Se l'oggetto in questione è in movimento, la sua velocità viene determinata dalla frequenza dell'onda riflessa. La determinazione della velocità media del flusso, porta a stimare la portata del debris flow, conoscendo l'area della sezione del canale in cui sono state eseguite le misure. La misura del volume di materiale depositato può essere facilmente eseguita attraverso rilievi topografici alla fine dell'evento; va preso però in considerazione il fatto che i fluidi interstiziali fuoriescono rapidamente dal deposito e quindi il volume misurato sarà diverso dal volume totale del flusso che contiene detriti, acqua ed aria. Dal deposito si può eseguire la misura della densità attraverso il campionamento di provini indisturbati, ma alcune difficoltà nascono dalla presenza di grandi massi. In questo caso la densità deve essere stimata in-situ pesando il materiale estratto da un foro e misurando il volume del buco, nel rispetto di metodi standard (AASHTO T 2-91). Stimare la densità del flusso in movimento è estremamente difficile. Un'altra misura importante, nel caso di un sistema Advance Warning, è quella relativa

alle piogge attraverso l'uso di pluviometri. Attraverso i dati raccolti vengono identificate delle soglie in funzione dell'intensità e della durata dell'evento di pioggia, oltre le quali si innesca il debris flow. Ovviamente queste curve variano da sito a sito, in relazione alla morfologia e alle caratteristiche del bacino idrografico. Tra le più utilizzate in letteratura troviamo la relazione di Caine [19]:

$$I = 14.82 \cdot D^{-0.39}$$

dove I indica l'intensità di pioggia espressa in millimetri per ora e D la durata dell'evento espressa in ore. Infine l'ultima quantità che può essere misurata attraverso dei sensori è la forza d'impatto che il debris flow esercita sulle strutture che incontra lungo il suo percorso. La misura viene eseguita con l'installazione di sensori di pressione (celle di carico) sugli elementi strutturali che possono essere colpiti. La forza d'impatto viene misurata in funzione di un segnale elettrico generato dalla deformazione del sensore stesso, dovuta al passaggio della colata.

Di seguito, nella **Figura 13** e nella **Figura 14**, vengono elencati vari tipi di sensore e il loro relativo utilizzo, mentre nella **Tabella 1** vengono riassunti i vantaggi e gli svantaggi dei sensori più comuni usati oggi.

Devices and methods	functions				performance				
	occurrence prediction	occurrence detection	proximity sensing	discharge estimation	contact (C) or non-contact (NC)	reuse /reset	working in bad weather	active (A) or passive (P)	low power
I. Euler group									
1. rain gauge	○	×	×	×	NC	Y	Y	P	Y
2. strain gauge	△	○	○	△	NC	Y	Y	P	Y
3. ultrasonic gauge	–	○	○	○	NC	Y	Y	A	Y
4. wire sensor	×	○	○	△	C	Y/N	Y	P/A	Y/N
5. pressure sensor	–	△	△	△	C	Y	Y	P	Y
6. ground vibration sensor									
(a) microphone	–	△	○	○	NC	Y	Y	P	Y
(b) seismometer	–	△	○	○	NC	Y	Y	P	Y
(c) moving coil	–	△	○	○	NC	Y	Y	P	Y
(d) piezoelectric	–	△	○	○	NC	Y	Y	P	Y
7. image processing									
(a) spatial filtering	×	△	○	△	NC	Y	*1	P	*2
(b) MPEG method	×	△	○	△	NC	Y	*1	P	*2
(c) STD method	×	△	○	△	NC	Y	*1	P	*2
(d) correlation	×	△	○	△	NC	Y	*1	P	*2
8. radar	–	△	○	△	NC	Y	Y	A	N
9. bucket/load cell	×	×	×	△	C	N	Y	P	N
10. Infrasonic sensor	–	○	○	–	NC	Y	Y	P	Y
II. Lagrange group									
1. accelerometer	–	△	△	–	C	N	Y	P	*3
2. integrated sensor	–	○	○	△	C	N	Y	P	*3

○ useful, △ possible, × impossible, – to be investigated

*1 difficult in fog, *2 with a computer system, *3 demand of high power for sending the signal

Abbreviations: MPEG; moving picture-coding experts group, STD; spatio-temporal derivative

Figura 13: Funzioni e Performance dei vari sensori [20]

Devices and methods	parameters of the flow									meteorological parameters		
	depth	velocity	vector velocity	discharge	impact force	viscosity	particle size	accumulated volume	sediment yield	rainfall intensity	accumulated rainfall	historical rainfall
I. Euler group												
1. rain gauge	×	×	×	×	×	-	×	×	×	○	○	○
2. strain gauge	×	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×
3. ultrasonic gauge	○	○	-	○	×	-	×	×	×	-	-	-
4. wire sensor	○	○	×	-	×	×	×	-	-	×	×	×
5. pressure sensor	△	△	-	△	○	-	-	△	-	-	-	×
6. ground vibration sensor												
(a) microphone	△	△	×	○	-	×	△	×	×	×	×	×
(b) seismometer	△	○	×	○	-	×	-	×	×	×	×	×
(c) moving coil	△	△	×	○	-	×	△	×	×	×	×	×
(d) piezoelectric	△	△	×	○	-	×	-	×	×	×	×	×
7. image processing												
(a) spatial filtering	-	○	○	-	×	×	△	-	×	×	×	×
(b) MPEG method	△	-	-	△	×	×	×	×	×	×	×	×
(c) STD method	-	○	○	-	×	×	×	×	×	×	×	×
(d) correlation	△	○	○	△	×	×	△	△	×	×	×	×
(e) AR synthetic model	×	×	×	-	×	×	○	-	×	×	×	×
8. radar	-	○	△	-	×	-	-	-	-	○	○	○
9. bucket/load cell	-	×	×	○	-	△	△	△	-	-	-	×
II. Lagrange group												
1. accelerometer	-	△	△	-	-	×	×	×	×	×	×	×
2. integrated sensor	△	○	○	△	-	○	-	×	×	×	×	×
3. GPS sensor	-	-	-	-	-	×	×	×	×	×	×	×
III. Satellite/Field survey group												
1. satellite image analysis	△	△	-	△	×	-	-	○	○	×	×	×
2. range finder	△	-	×	△	×	×	×	△	△	×	×	×
3. electrical sensing	-	×	×	-	-	△	△	△	△	-	-	×
4. sampler/measure	×	×	×	×	×	-	○	○	○	×	×	×

○ useful, △ possible, × impossible, - to be investigated

Abbreviations: MPEG; moving picture-coding experts group, STD; spatio temporal derivative, AR; auto regressive

Figura 14: Parametri dei vari sensori [20]

Tabella 1: Vantaggi e Svantaggi dei sensori più comuni [16]

Sensore ad ultrasuoni	✓ Facile individuazione delle soglie di pericolo	✗ Difficile installazione (appesi sopra il canale)
Geofoni, Sismometri	✓ Installazione facile e sicura	✗ Difficile individuazione delle soglie di pericolo ✗ Rischio di falsi allarmi
Pendolo	✓ Dispositivo semplice e robusto	✗ Deve essere appeso sopra il canale: installazione difficile se le sponde sono instabili
Wire sensors	✓ Dispositivo semplice e robusto	✗ Necessità di essere reinstallati dopo il passaggio del debris flow ✗ Rischio di falsi allarmi
Videocamera	✓ Installazione facile e sicura (di fianco al canale)	✗ Il suo uso può essere compromesso dalla presenza di nebbia o da condizioni di luce scarsa (notte)

1.4 WARNING SYSTEM: CASI STUDIO

A causa delle loro peculiari caratteristiche, come la rapidità dell'evento, la breve durata, l'alta velocità di propagazione e la dannosità, il compito di gestire in tempo reale un sistema di allarme per i debris flows risulta particolarmente difficile. Un sistema di allarme è probabilmente più affidabile per la protezione di vie di trasporto piuttosto che per la protezione di zone abitate dal momento in cui è più semplice intervenire in tempo per impedire l'uso di un'infrastruttura anziché evacuare gli abitanti delle zone in pericolo [10].

1.4.1 Il caso del torrente Illgraben

Il bacino idrografico del torrente Illgraben (**Figura 15**), situato nel Canton Vallese nella parte sud-orientale della Svizzera, ha un'estensione di 9.5 km² ed è caratterizzato da un'elevata attività franosa. In particolare il 44% del bacino è composto da roccia affiorante e depositi di detriti, il bosco costituisce il 42% della superficie, mentre una porzione più limitata, pari al 12%, è costituita da superfici prative. La pendenza media del canale del torrente è del 16% (9°) con una diminuzione verso valle fino al 10% [21].

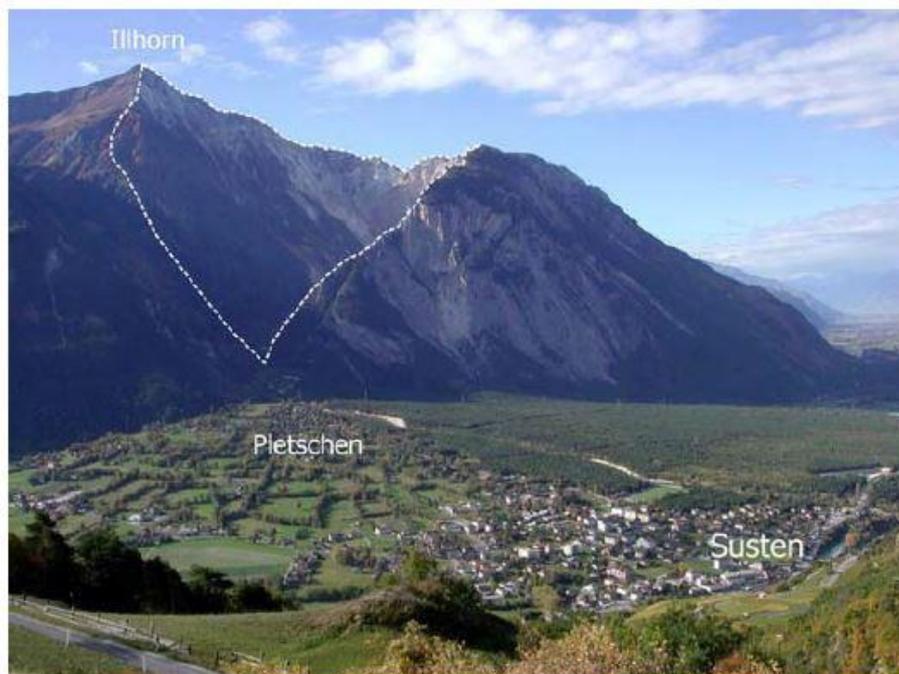


Figura 15: Bacino idrografico del torrente Illgraben

Durante la progettazione del sistema di allarme per il torrente Illgraben sono stati definiti quattro moduli:

1. Informare la comunità: disseminazione di informazioni per turisti e residenti, educazione nelle scuole sul rischio di debris flow e definizione di procedure di evacuazione.
2. Sistema di monitoraggio: generazione di un allarme automatico in caso di attivazione di un debris flow.
3. Osservazione del bacino idrografico: osservazioni sistematiche delle variazioni geomorfologiche e compilazione di un database.
4. Previsioni meteorologiche: miglioramento delle previsioni metereologiche a lungo termine per determinare la probabilità di occorrenza di debris flows.

Il sito presenta quindi diversi dispositivi per l'osservazione e il monitoraggio di debris flow dall'anno 2000; tali sensori sono in grado di attivare semafori e sirene dislocati sui tre principali sentieri che attraversano il letto del torrente. Inoltre per informare le persone sono presenti cartelli di pericolo, posizionati mediamente ogni 200 metri su entrambe le sponde del torrente, dalla sorgente fino alla confluenza con il fiume Rodano, i quali avvertono del rischio che si corre attraversando il letto del torrente ed invitano a farlo il più velocemente possibile, senza sostarvi.

Il sistema è stato progettato per garantire un allarme rapido e affidabile in caso di attivazione di debris flow. L'impianto usa il *Sistema Globale per Comunicazioni Mobili* (Rete GSM) per l'invio dei dati registrati dai sensori e sul loro eventuale malfunzionamento. Per massimizzare il tempo di allarme, cioè il tempo che intercorre tra il segnale di allarme e l'arrivo del debris flow nell'area a rischio, i sensori sono stati installati il più possibile a monte, in corrispondenza delle briglie frangicolata 9 e 10 (CD9, CD10) evidenziate in **Figura 16**. Un punto di rilevamento addizionale è posizionato in corrispondenza della briglia frangicolata 1 (CD1), ma questa posizione è meno affidabile poiché i pannelli solari, che permettono la ricarica delle batterie, ricevono per poche ore la luce solare diretta e il segnale GSM è debole. Per determinare accuratamente il passaggio di un debris flow dei geofoni sono stati fissati alle briglie frangicolata, i quali riescono a registrare il movimento del flusso e dei massi che ne costituiscono il fronte. Il numero di impulsi per secondo e la loro durata vengono estratti dal segnale registrato dai

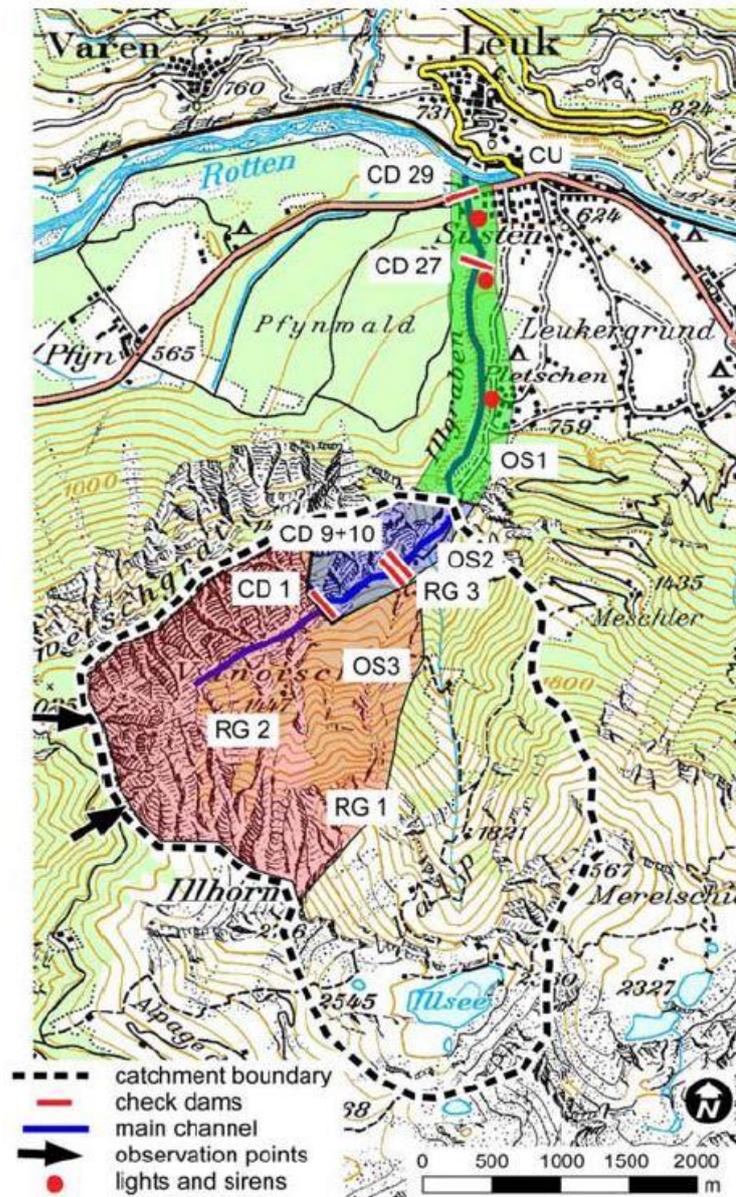


Figura 16: Panoramica del bacino idrografico del torrente Illgraben che mostra le principali posizioni degli elementi che costituiscono il sistema di allarme [21]

geofoni e se tali impulsi superano un valore limite il sistema invia un segnale di allarme che fa attivare semafori e sirene nella zona di valle a rischio. La durata dell'allarme è impostata pari a 20 minuti, lasso corrispondente al tempo di percorrenza stimato per un debris flow dal punto di rilevamento fino alla confluenza con il fiume Rodano. Inoltre durante un allarme lo stato dei sensori è controllato ogni 5 minuti e i sistemi di allarme vengono spenti dopo dieci minuti che i valori sono al di sotto delle soglie limite. Questa procedura è utile in caso di falsi allarmi causati da vibrazioni del suolo dovuti a terremoti, caduta di massi o altri processi simili. Per implementare il sistema vengono utilizzati

anche sensori ad ultrasuoni per rilevare la profondità del flusso e se questa eccede le soglie di sicurezza per più di 5 secondi: se questo si verifica il sistema attiva i dispositivi di allarme.

L'affidabilità e l'efficacia del sistema di allarme aumentano con l'aiuto di costanti osservazioni del bacino idrografico, le quali hanno lo scopo di individuare nuove condizioni di pericolo che potrebbero portare ad innescare un debris flow. Per facilitare queste osservazioni il bacino è stato diviso in tre settori: la parte di bacino a monte della briglia frangicolata 1 denominato Settore 3 (in rosso nella **Figura 16**), il Settore 2 tra la briglia frangicolata 1 ed il culmine del bacino (in blu nella **Figura 16**) ed infine il Settore 1 che costituisce la porzione di canale fino al punto di confluenza con il fiume Rodano (in verde nella **Figura 16**). Questa divisione spaziale permette una efficiente valutazione dello stato dell'intero bacino attraverso osservazioni sicure poiché i Settori 1 e 2 sono facilmente accessibili, mentre per il Settore 3, difficilmente accessibile, esistono diversi punti di osservazione all'esterno del bacino. Per avere un quadro più completo della situazione in cui si trova il bacino sono stati installati anche 3 pluviometri (indicati con la sigla RG in **Figura 16**) in modo da poter tenere sotto controllo le piogge che potrebbero portare all'innescamento di un debris flow.

Dal momento in cui il sistema è stato installato nel bacino del torrente Illgraben sono stati registrati nove eventi pericolosi e per sei di questi il tempo per l'attivazione dell'allarme è stato soddisfacente: i semafori e le sirene si sono attivati diversi minuti prima dell'arrivo del fronte del debris flow. Nei rimanenti tre casi il tempo di allarme è stato di durata insufficiente. Questo fatto riflette la complessità degli eventi naturali, l'allarme potrebbe spegnersi troppo presto, prima dell'arrivo del fronte principale del debris flow nella zona a rischio poiché la sua velocità potrebbe essere più bassa di quella stimata e utilizzata per progettare il sistema di allarme. Un altro problema è dovuto ai fenomeni costituiti da più ondate. In particolare quando la prima ondata è costituita da un piccolo flusso che lascia depositi fangosi non significanti nel canale e la seconda ondata è invece di dimensioni maggiori e costituisce la vera fonte di pericolo: le persone potrebbero avere la tentazione di attraversare il canale dopo l'arresto dei segnali di allarme tra la prima e la seconda ondata. In questo caso il problema può essere facilmente risolto andando ad estendere la durata dell'allarme o installando stazioni di monitoraggio aggiuntive.

1.4.1.1 Confronto con altri siti

Il sistema descritto per il torrente Illgraben non è una soluzione che può essere applicata a tutte le situazioni di monitoraggio. Dato un generico bacino non ci sono standard o linee guida riguardo l'utilizzo di specifici sensori e la loro disposizione ottimale, poiché queste caratteristiche dipendono dallo scopo del monitoraggio e dalla configurazione topografica del sito in esame (in riferimento alla sicurezza e all'accessibilità di alcune parti del bacino).

Per avere un quadro generale di quanto complesso sia questo problema, vengono presi in esame nove diversi siti situati in diverse parti del mondo, uno negli USA, tre in Asia e cinque in Europa (**Figura 17**) [22]:

- a) **Chalk Cliffs (USA):** collocato in Colorado alla base di Mount Princeton nella catena delle Montagne Rocciose del Nord America presenta un sistema di monitoraggio dal 2004. Il bacino idrografico ha un'estensione di 0.06 Km² e presenta diverse stazioni di monitoraggio collocate principalmente nel tratto superiore del canale che lo attraversa, il quale ha una pendenza che varia tra i 5° e i 15°. Il Monsone Messicano (North American Monsoon) causa piogge e temporali caratterizzati da correnti convettive durante i mesi estivi (Luglio e Agosto), tali temporali coinvolgono i detriti accumulati nel canale innescando fenomeni che portano alla formazione di debris flows. Generalmente si registrano da uno a cinque eventi di debris flow ogni anno.
- b) **Ergou (Cina):** all'inizio del 2013 il bacino di Ergou è stato selezionato come sito di monitoraggio a causa dei suoi frequenti debris flows durante la stagione delle piogge tra Aprile e Settembre. La frequenza è particolarmente aumentata (2 o 3 eventi all'anno) successivamente al terremoto di Wenchuan del 2008. Il bacino copre un'area molto vasta di 39.4 Km² e la lunghezza del canale principale è di 11.5 Km. La pendenza che caratterizza il canale varia tra i 6° e gli 8°.
- c) **Gadria (Italia):** il bacino del torrente Gadria (6.3 Km²) è situato all'interno del più ampio bacino del fiume Adige nella Val Venosta, valle delle Alpi italiane. La prima rete di monitoraggio permanente è stata installata nella primavera del 2011 e prevede due diverse aree equipaggiate per il monitoraggio di debris flow. La stazione posta nella zona inferiore ha lo scopo di caratterizzare la dinamica del

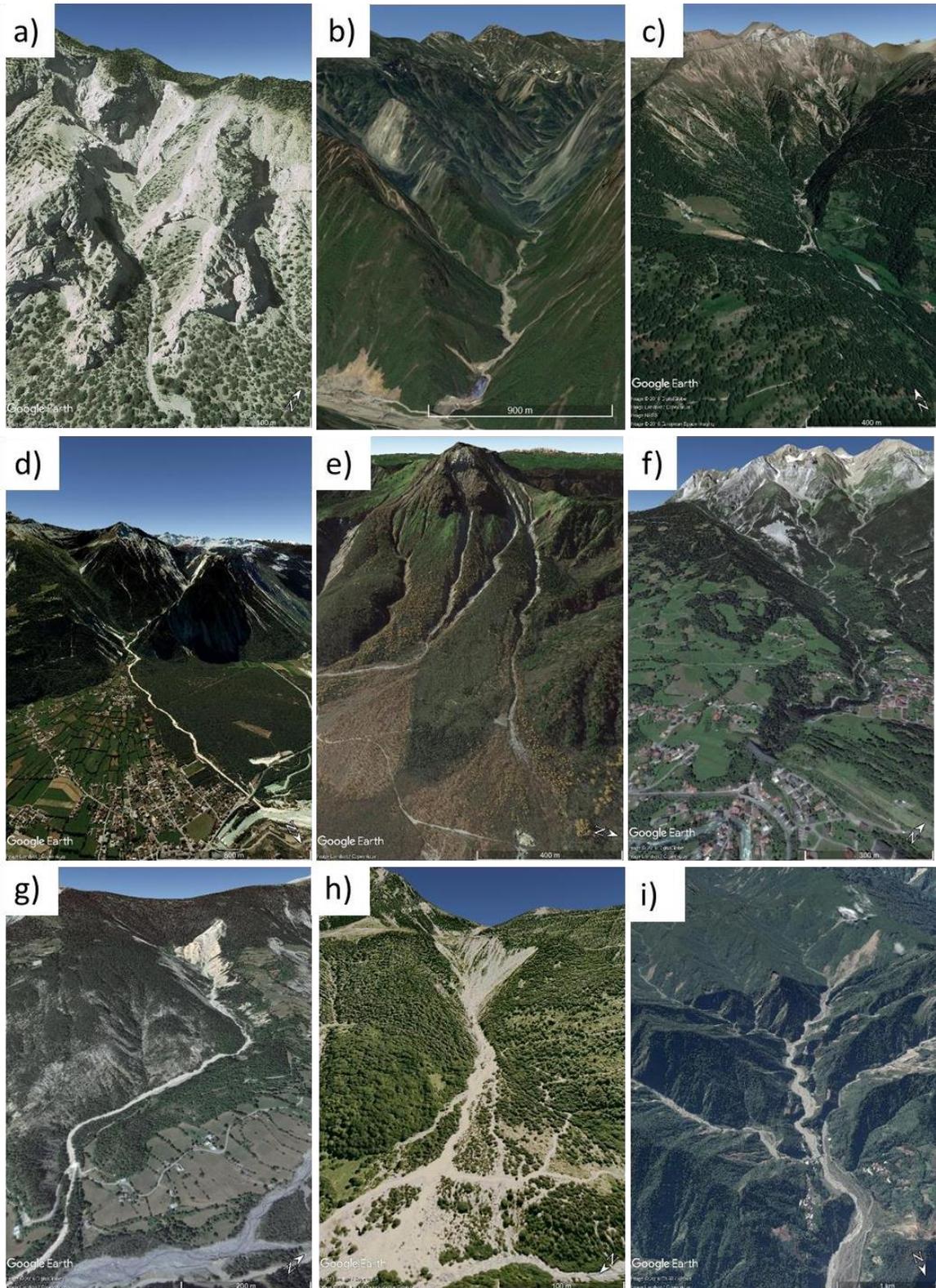


Figura 17: a) Chalk Cliffs (USA); b) Ergou (Cina); c) Gatria (Italia); d) Illgraben (Svizzera); e) Kamikamihori (Giappone); f) Lattenbach (Austria); g) Réal (Francia); h) Rebaixader (Spagna); i) Shenmu (Taiwan) [22]

flusso, il processo di erosione e deposito e sviluppare delle procedure di allarme. La stazione posta nella parte superiore del bacino ha invece lo scopo di investigare le condizioni di innesco del debris flow. Inoltre nel 1970 fu costruito un bacino di deposito, più grande del bacino idrografico stesso, per proteggere i centri abitati a rischio. Questo bacino viene periodicamente svuotato, ma rimane sempre una probabilità di rischio se dovesse verificarsi un debris flow estremamente ampio da eccedere la capacità del bacino di deposito.

- d) **Illgraben (Svizzera):** cfr. Capitolo 1.4.1.
- e) **Kamikamihori (Giappone):** il bacino di Kamikamihori è posto sul versante est del Monte Yake, un vulcano attivo nel Giappone centrale. L'area del bacino e la lunghezza del canale misurano rispettivamente 0.8 Km² e 2.5 Km, con una pendenza media di 3.5°. Questo sito è stato scelto per il monitoraggio di debris flow dopo che il vulcano ha eruttato nel 1962 (27 eruzioni si sono verificate dal 1585) e da questo momento la frequenza di debris flows è notevolmente aumentata fino a raggiungere un picco di 13 eventi nel 1969. Per questo motivo, a partire dal 1970, si è avviata una campagna di monitoraggio. Grazie al ripristino di vegetazione, il quale ha incrementato la capacità di infiltrazione del suolo e ridotto di conseguenza il deflusso superficiale, dal 1980 la frequenza di debris flows ha subito un considerevole decremento.
- f) **Lattenbach (Austria):** situato nella parte ovest dell'Austria è uno dei torrenti più attivi della nazione con una lunghezza di 5.2 Km. Il bacino idrografico copre un'area di 5.3 Km² e la pendenza media del canale è di circa 8°. I primi eventi registrati risalgono al 1911, ma una rete di monitoraggio è stata installata soltanto nel 2002, mentre già dal 1908 furono iniziate a costruire delle briglie frangicolata per stabilizzare il canale. In totale sono state realizzate 33 briglie, anche se una parte considerevole di queste è andata distrutta, soprattutto quelle situate nella parte centrale del bacino.
- g) **Réal (Francia):** Il Réal è un torrente attivo delle Prealpi Francesi dove un sistema di monitoraggio è presente a partire dalla seconda metà del 2010. Inizialmente tre stazioni di monitoraggio erano distribuite lungo il torrente per esaminare le condizioni di innesco e propagazione di debris flows. Dal 2017 la stazione intermedia è stata rimossa per facilitare e diminuire i costi della manutenzione.

Gli eventi più pericolosi si verificano in primavera ed estate, ma alcuni episodi possono verificarsi anche durante il periodo dello scioglimento delle nevi. L'innescò di un debris flow è dovuto principalmente alla ripida pendenza del versante e da un alto apporto di sedimenti, i quali vengono rilasciati in seguito all'erosione della parte sommitale del bacino, priva di vegetazione. Questa zona costituisce circa il 30% dell'intero bacino idrografico.

- h) Rebaixader (Spagna):** collocato nella catena montuosa dei Pirenei, questo sistema di monitoraggio è attivo dall'estate del 2009. È un sito di grande interesse per lo studio di debris flow poiché grazie alla dimensioni limitate del bacino idrografico (0.53 Km²) ed all'intensa attività, l'intero processo (innescò, propagazione e deposito) può essere osservato entro la distanza di 1 Km. Generalmente vengono registrati due o tre eventi ogni anno, che si verificano durante il periodo estivo (da Giugno a Settembre); qualche evento occasionale si verifica in primavera a causa della combinazione di piogge e scioglimento delle nevi.
- i) Shenmu (Taiwan):** il bacino idrografico in esame fa parte del bacino del fiume Chen-Yu-Lan, il più grande sistema fluviale in Taiwan. Questo bacino è formato da tre torrenti che confluiscono in un unico torrente nei pressi del villaggio di Shenmu. In tutti e tre i torrenti esiste la possibilità di innescò di un debris flow e l'intera area di drenaggio del bacino si estende per 72.2 Km². Il sistema di monitoraggio è attivo dal 2002 e da allora sono stati registrati e monitorati 16 eventi. Inizialmente erano presenti delle briglie frangicolata che sono andate distrutte durante questi eventi. Il governo locale ha provato a trasferire gli abitanti del villaggio in zone più sicure, ma molti vivono ancora a Shenmu.

Attraverso una rassegna della letteratura e da un'attenta analisi dei nove siti descritti, sono emerse importanti considerazioni [22]. I bacini esaminati presentano estensioni e caratteristiche geomorfologiche molto diverse tra loro, l'intensità di pioggia per innescare il fenomeno varia tra i 5 e i 15 mm/h ed i volumi dei debris flows spaziano da poche centinaia fino a quasi un milione di metri cubi. I sensori utilizzati in questi sistemi di monitoraggio possono essere divisi in due classi: una classe che comprende i sensori per il monitoraggio dei meccanismi di innescò ed una che analizza la dinamica del flusso. Della prima categoria fanno parte principalmente pluviometri e sensori per la misura di

umidità del terreno e della pressione interstiziale; nella seconda categoria rientrano i geofoni, sensori ad ultrasuoni, videocamere e tutti quei sensori atti a registrare il passaggio del flusso in movimento. Quindi un importante aspetto nella progettazione di un sistema di monitoraggio è quello di scegliere in modo adeguato i sensori e prevedere una loro costante manutenzione, soprattutto nei siti più vulnerabili. La manutenzione è un'attività che, molto spesso, richiede il consumo di molte risorse e tempo poiché problemi tecnici possono nascere a causa di molteplici ragioni sia di origine tecnica sia di origine naturale. Per questo un sistema remoto che controlla costantemente lo stato di tutti i sensori, per identificare l'eventuale necessità di manutenzione, è fortemente consigliato, mentre risulta praticamente obbligatorio se si vuole realizzare un sistema di allarme efficace.

Nella **Tabella 2** e nella **Tabella 3** vengono riportate rispettivamente le caratteristiche generali di ogni bacino esaminato ed il tipo e il numero di sensori utilizzati. Infine nella **Tabella 4** vengono illustrate alcune informazioni relative ai vari sensori, come i parametri misurati, la distanza di installazione dal canale ed l'ordine di grandezza del loro costo.

Tabella 2: Caratteristiche generali dei nove siti in esame [22]

Catchment	Country - Region	Year of installation	# of check dams	Retention basin	Maximum altitude (m asl)	Drainage area (km ²)	Channel length (km)	Mean slope of fan (degree)
Chalk Cliffs	USA	2004	0	no	3140	0.3	1	9
Ergou	China	2013	0	yes	4120	39.4	11.5	4
Gadria	Italy	2011	20	yes	2945	6.3	3	7
Illgraben	Switzerland	2000	30	no	2716	11.7	5.5	10
Kamikamihori	Japan	1970	8	no	2455	0.8	2.5	3.5
Lattenbach	Austria	2002	33	no	2930	5.3	5.2	8
Réal	France	2010	8	no	2090	2.3	2.6	9
Rebaixader	Spain	2009	0	no	2475	0.53	1.4	18
Shenmu	Taiwan	2002	3	no	2850	72.2	17.7	8.5

Tabella 3: Tipo e numero di sensori utilizzati per ogni sito [22]

Catchment	Rain gauge	Video camera	Flow depth sensors				Seismic or infrasonic sensors			Surface velocity sensor	Erosion sensor	PWP sensor	Force plate	Sensor pillar / wall	SM / PWP sensor	Trip wire sensor
			Ultrasonic	Radar	Laser point	Laser 2D scanner	Geophone	Seismometer	Infrasound							
Chalk Cliffs	6	6			3		2				1		1		6	
Ergou	3	3	3							3		2	1		2/0	
Gadria	3	4		3		1	4			1			2	1		
Illgraben	3	4	1	2	2		5	8	1		1	1	1	1	1/0	
Kamikamihori	1	3	2					1		1		2	1		3/0	30
Lattenbach	1	1		4		1	2	1	3	1						4
Réal	2	2	2	1			8									
Rebaixander	1	1	1	1			5								8/2	
Shenmu	2	4		1			2	4							2/0	6

Tabella 4: Informazioni relative ai sensori [22]

Sensor	Parameter	Distance (m)	Cost (€)
Rain gauge	Rainfall, precipitation	1 - 100	10 ²
Time / Frequency Domain Reflectometry (TDR / FDR)	Soil water content	0 - 100	10 ²
Tensiometer	Negative pore water pressure	0 - 100	10 ²
Pressure sensor	Positive pore water pressure	0 - 100	10 ²
Video camera	Flow regime, flow magnitude, surface velocity etc.	1 - 100	10 ³
Stage sensor	Flow depth	0	10 ³
Geophone	Ground vibration	1 - 100	10 ²
Seismometer	Ground vibration	1 - 1000	10 ³
Infrasound sensor	Air pressure fluctuation	1 - 1000	10 ³
Doppler radar	Surface velocity	1 - 100	10 ⁴
Entrainment sensor	Erosion	0	10 ³
Load cell	Basal, lateral and impact stress	0	10 ³

1.5 LA FIBRA OTTICA COME NUOVA ALTERNATIVA DI MONITORAGGIO

Nel campo della sensoristica le tecniche di monitoraggio sono sostanzialmente basate sull'uso di un numero finito di sensori posizionati nei punti di maggior interesse per estrarre informazioni di rilievo sui principali parametri che governano il problema in esame [23]. Per questo la fibra ottica è stata proposta come un'affidabile e performante alternativa nel campo del monitoraggio. La fibra è infatti in grado di fornire un'ampia copertura ed informazioni continue e in tempo reale sulla variazione degli specifici parametri misurati. Per esempio nei sensori distribuiti a fibra ottica (Distributed Optical Fiber Sensors, DOFS) le variazioni dovute a fenomeni esterni come vibrazioni, variazioni di temperatura e/o pressione, possono essere localizzati lungo l'intera lunghezza della fibra (anche se la sua lunghezza è dell'ordine dei chilometri) con eccellente precisione poiché ogni punto del cavo è un elemento sensibile e contribuisce all'output del segnale (**Figura 18**) [24]. Questo è possibile conoscendo il normale comportamento della fibra ottica in termini di attenuazione, ovvero la diminuzione del segnale propagato, ed analizzando eventuali variazioni locali dell'indice di rifrazione causate da forze esterne.

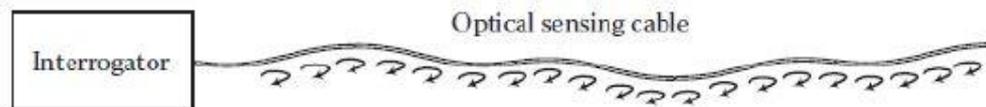


Figura 18: Sensore distribuito a fibra ottica (DOFS)

La fibra ottica è un materiale costituito da filamenti vetrosi estremamente puri, realizzati in modo da poter condurre al loro interno la luce. La luce è condotta in un nucleo cilindrico centrale, detto *core*, rivestito da un mantello che prende il nome di *cladding*. Il cavo è rivestito con una guaina, detta *buffer*, che ha la funzione di proteggere la fibra da umidità e danni fisici (**Figura 19**). Il nucleo presenta un diametro molto piccolo che può variare tra i 10 e i 50 μm , mentre il mantello ha un diametro di circa 125 μm . Nel primo caso il nucleo è talmente piccolo che la luce può viaggiare soltanto sotto forma di un singolo raggio (Single Mode Fiber), mentre nel secondo la luce entra nel nucleo con un certo angolo e si propaga mediante una serie di riflessioni lungo la superficie di separazione fra i due materiali del nucleo e del mantello (Multi Mode Fiber) (**Figura 20**).

Per far sì che questo si verifichi, i due strati interni sono realizzati con indice di rifrazione diverso, in particolare quello del mantello deve risultare leggermente inferiore a quello del nucleo [25, 26].

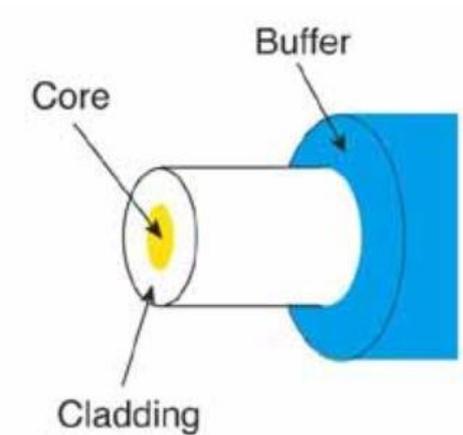


Figura 19: Struttura della fibra ottica [27]

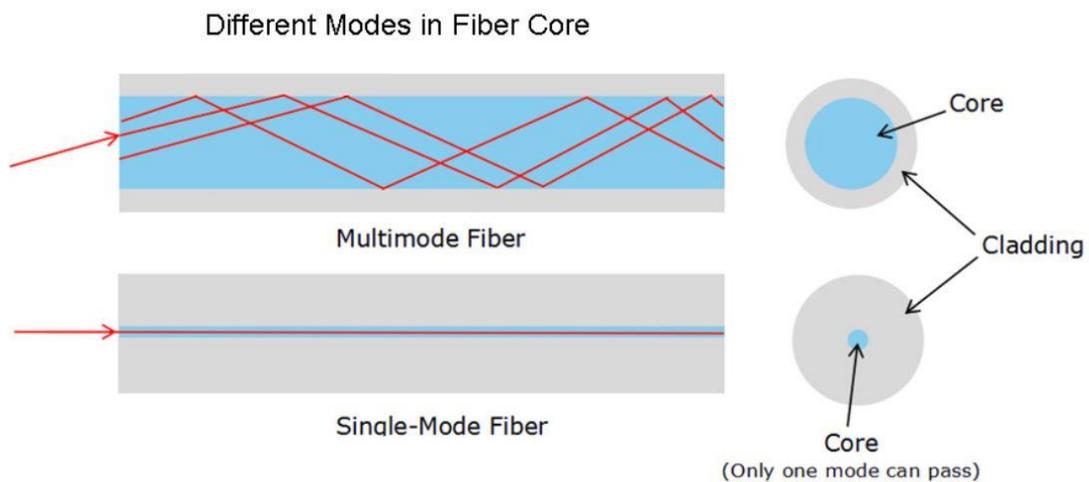


Figura 20: Single Mode Fiber e Multi Mode Fiber [28]

Di particolare interesse risulta il fenomeno di scattering (diffusione ottica), il quale corrisponde ad una deflessione in direzione casuale della traiettoria del fascio di luce che attraversa il nucleo della fibra. Questo fenomeno è causato dall'eterogeneità del materiale che causa una piccola variazione locale dell'indice di rifrazione. Si possono distinguere due tipi di attenuazione:

- Attenuazione intrinseca: causata dalle impurità della fibra di vetro formatesi durante il processo di produzione (impossibile eliminarle totalmente). Quando la luce colpisce una di queste impurità, essa viene assorbita o diffusa, o entrambe.
- Attenuazione estrinseca: si verifica a causa di fattori esterni come variazioni di temperatura o di pressione, in corrispondenza di giunzioni tra due cavi o in corrispondenza di pieghe, deformazioni e rotture della fibra ottica. Questi fattori portano ad una variazione dell'indice di rifrazione.

Un'applicazione dell'uso della fibra ottica come sensore di monitoraggio è presa in considerazione nello studio per la messa in sicurezza di Beichuan County, città cinese che si trova in un'area a rischio frane e colate detritiche. La fibra ottica viene incollata a dei tubi di acciaio ancorati al terreno e tra questi viene posta una rete per la trattenuta dei detriti; quando il debris flow attraversa la sezione dove è posto questo dispositivo, la forza d'impatto sui tubi di acciaio causa un'attenuazione del segnale nella fibra ottica [29].

Questo sistema presenta però dei problemi, in particolare per quanto riguarda le apparecchiature necessarie per la valutazione dell'attenuazione del segnale lungo la fibra ottica. Questi dispositivi risultano essere molto delicati, costosi ed ingombranti, quindi non adatti ad un uso continuo in ambienti esterni. Pertanto per la progettazione di un sistema di allarme per debris flow è necessario pensare ad una differente applicazione della fibra ottica come sensore. Un'alternativa può essere trovata andando ad analizzare le variazioni di polarizzazione della luce che viaggia all'interno della fibra ottica, variazioni dovute alla presenza di forze esterne [25].

1.5.1 Sistema basato sull'analisi della polarizzazione della luce

Il funzionamento di questo sistema è completamente differente da quello visto in precedenza, sia in termini di funzionamento sia in termini di costo. Il sistema si basa sull'analisi della polarizzazione della luce che viaggia all'interno della fibra ottica; la polarizzazione è facile da valutare e può essere convertita in segnale di allarme una volta che si verifica un evento pericoloso. A differenza di quanto già visto, in questo caso non si parla di un sensore distribuito, perciò la posizione in cui si verifica l'evento non può essere valutata. Questo è uno svantaggio, ma non del tutto un problema poiché il principale scopo è quello di segnalare un evento pericoloso in atto in tutta l'area a rischio e la localizzazione non è strettamente necessaria. Inoltre in questo caso è necessario

l'accesso ad entrambi gli estremi della fibra, i quali verranno collegati uno ad un laser e l'altro ad un analizzatore di polarizzazione.

1.5.1.1 Luce polarizzata e parametri di Stokes

Un'onda si dice polarizzata quando la vibrazione del vettore elettrico associato alla radiazione presenta una preferenza circa la direzione, sempre comunque in un piano ortogonale alla direzione di propagazione dell'onda [30]. Il grado di polarizzazione (DOP) di un'onda parzialmente polarizzata può essere definito modellando tale onda come sovrapposizione di un'onda totalmente polarizzata e una completamente non polarizzata. Poiché questa modellazione risulta complessa si fa riferimento ad una diversa grandezza che prende il nome di vettore di Stokes. Tale vettore è composto da quattro termini che determinano lo stato di polarizzazione (SOP) del segnale e viene così rappresentato:

$$\begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix}$$

Questi quattro parametri possono essere definiti in funzione di due parametri che definiscono l'ellisse di polarizzazione: l'angolo di azimut φ e l'angolo di ellitticità χ (**Figura 21a**).

$$S_0 = I$$

$$S_1 = Ip \cdot \cos(2\varphi) \cdot \cos(2\chi)$$

$$S_2 = Ip \cdot \sin(2\varphi) \cdot \cos(2\chi)$$

$$S_3 = Ip \cdot \sin(2\chi)$$

In queste espressioni I indica l'intensità totale e p il DOP. Il prodotto tra I e p può essere visualizzato in una sfera in cui i parametri di Stokes costituiscono gli assi cartesiani (**Figura 21b**).

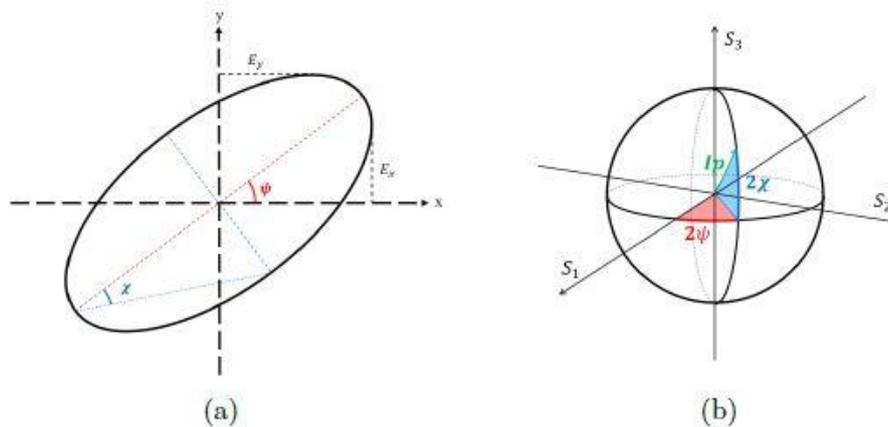


Figura 21: Rappresentazione dell'ellisse di polarizzazione (a) e della sfera in cui i parametri di Stokes costituiscono gli assi cartesiani [25]

Molto più utile è normalizzare le espressioni dei parametri di Stokes, dividendoli per il prodotto tra I e p; in questo modo possono essere definiti i seguenti parametri:

$$s_1 = \cos(2\varphi) \cdot \cos(2\chi)$$

$$s_2 = \sin(2\varphi) \cdot \cos(2\chi)$$

$$s_3 = \sin(2\chi)$$

A questo punto il grado di polarizzazione (DOP) può essere espresso in funzione dei precedenti parametri come:

$$DOP = \sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2}$$

I parametri normalizzati possono assumere valori compresi tra -1 e 1, un'onda completamente polarizzata è caratterizzata da un DOP=1 e quindi l'equazione descrive una sfera di raggio unitario. Pertanto ogni SOP, espresso in funzione dei parametri di Stokes normalizzati, può essere rappresentato sulla superficie o all'interno di una sfera di raggio unitario, la quale prende il nome di Sfera di Poincarè. La distanza tra il punto rappresentato e il centro della sfera fornisce il DOP del segnale: la luce completamente polarizzata è rappresentata da un punto sulla superficie della sfera (DOP=1), mentre la luce parzialmente polarizzata è rappresentata da un punto all'interno del volume della sfera (DOP<1) [25].

Nei casi reali, un evento esterno causa una repentina variazione dello stato di polarizzazione, che si traduce in un rapido movimento, del punto rappresentativo del SOP, sulla superficie della sfera di Poincaré (**Figura 22**). Andando ad analizzare gli spostamenti e la velocità di spostamento di tale punto sulla sfera, è quindi possibile valutare l'occorrenza di un evento (**Figura 23**).

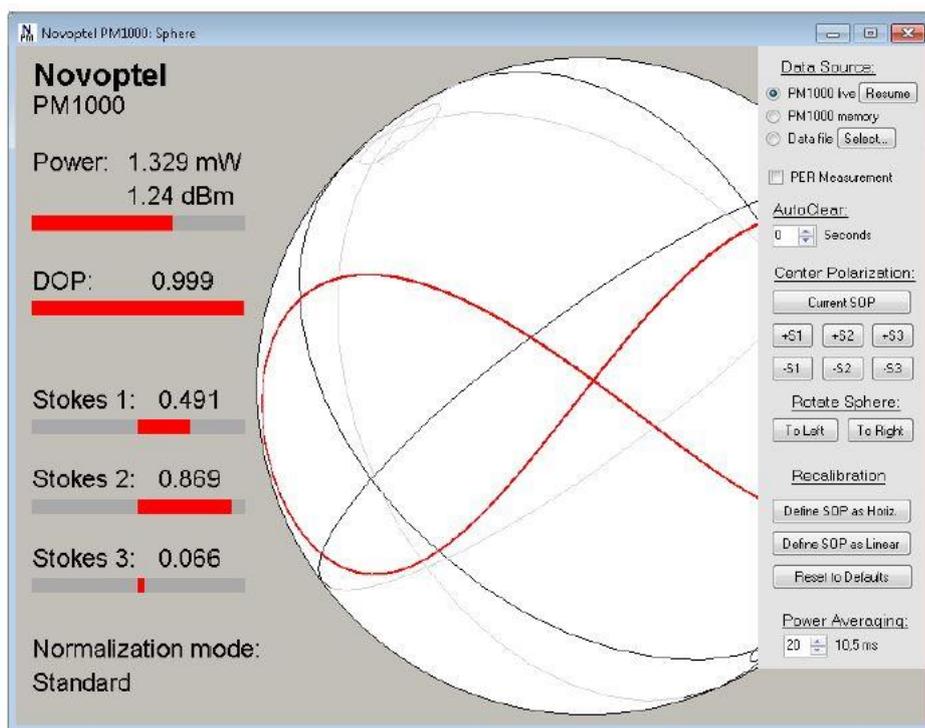


Figura 22: Esempio di movimento del punto rappresentativo dello stato di polarizzazione sulla superficie della sfera di Poincaré [31]

Lo spostamento sulla superficie della sfera viene calcolato valutando la distanza ortodromica tra le due posizioni del punto rappresentativo dello stato di polarizzazione prima e dopo l'evento. Pertanto, essendo una distanza misurata lungo l'arco di una circonferenza, viene espressa in radianti [rad].

La velocità con cui lo stato di polarizzazione varia la sua posizione sulla sfera è un altro parametro molto importante per la valutazione dell'occorrenza di un evento. Quando questo si verifica, la velocità sarà molto elevata. Tale grandezza assume il valore di una velocità angolare e viene pertanto misurata in radianti al secondo [rad/s].

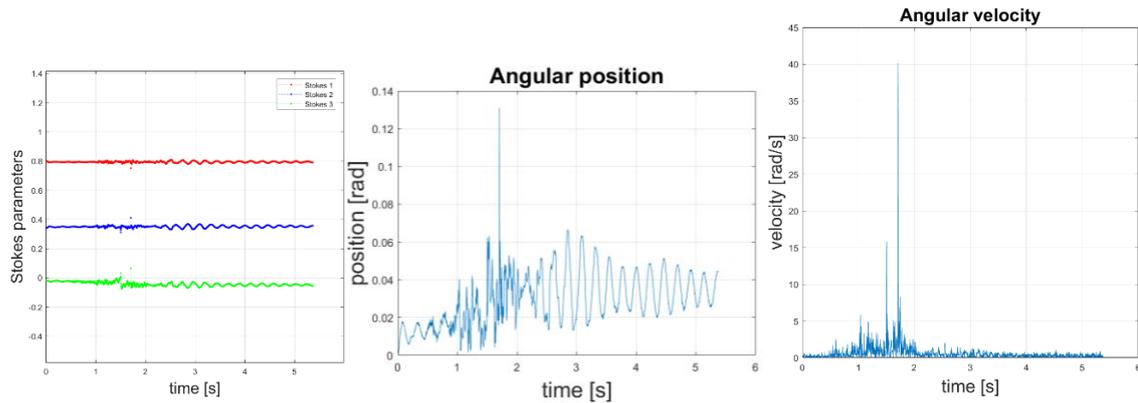


Figura 23: Esempio di parametri di Stokes, spostamenti e velocità angolare

1.5.1.2 Principio di funzionamento

Il sistema si basa sull'idea di rilevare un debris flow osservando le grandi variazioni nel tempo dello stato di polarizzazione all'interno della fibra ottica, dovute al passaggio del flusso. In caso di un evento pericoloso, il sensore deve immediatamente riconoscere la criticità e inviare un segnale di allarme per mettere in sicurezza l'area a rischio.

Il funzionamento del sensore è molto semplice, un diodo laser, collegato ad un estremo della fibra, emette un fascio di luce al suo interno, mentre all'altro estremo è connesso un analizzatore di polarizzazione che permette di misurare lo stato di polarizzazione dell'onda emessa. I parametri di Stokes non si comportano esattamente tutti nello stesso modo e a volte le variazioni sono evidenti soltanto per due o tre di essi: il segnale di allarme viene inviato soltanto quando si verifica una grande variazione di tutti i parametri.

Uno dei principali limiti del sistema è quello di non essere sufficientemente robusto contro i falsi allarmi, per esempio, un evento "puntuale" può causare una variazione della polarizzazione della luce e venir identificato come evento pericoloso, anche se non lo è.

Per migliorare l'affidabilità di tale strumento sarà quindi necessaria una campagna sperimentale basata su prove di laboratorio per valutare l'effettivo comportamento del sensore e calibrarlo andando ad individuare delle soglie di allarme.

2 CASI STUDIO IN LABORATORIO

Il presente capitolo illustra alcuni casi studio riferiti a recenti esperimenti effettuati in laboratorio per la determinazione del comportamento di un debris flow. È importante identificare le caratteristiche principali del suo movimento e stimare la potenziale area di deposizione in modo da poter migliorare l'efficacia dei sistemi di difesa e monitoraggio.

2.1 ANALISI DELLE CARATTERISTICHE DEL FLUSSO E DEL DEPOSITO

Nel seguente caso studio sono stati effettuati dei test con lo scopo di simulare un debris flow e valutarne le principali caratteristiche. In particolare le prove vogliono evidenziare come il comportamento della colata varia in funzione della pendenza del canale e della viscosità del fluido [32].

2.1.1 Configurazione del test

Gli esperimenti sono stati eseguiti su un canale in PVC rinforzato e trasparente con una lunghezza complessiva di 2.4 metri e una sezione rettangolare di 0.16 m x 0.2 m come mostrato in **Figura 24**. La miscela di detriti è posta in un serbatoio di accumulo situato nella parte più alta del canale e il suo rilascio avviene attraverso la rimozione manuale di un pannello da parte di un operatore. Alla fine del canale, per la valutazione delle caratteristiche del deposito, è posta una tavola di 2.0 m x 0.9 m contrassegnata da una griglia quadrata con lati di 0.1 m.

Per riprodurre al meglio il flusso è stata usata una miscela di argilla, sabbia e ghiaia con aggiunta di acqua. In tale modo è stato possibile riprodurre l'intero profilo della colata, a partire dall'onda di testa composta dai sedimenti con maggiori dimensioni, fino al flusso fangoso terminale. Sono state create due miscele con diverso contenuto di acqua e sedimenti in modo da poter studiare flussi con diversa viscosità; entrambe le fasi (acqua e sedimenti) sono state accuratamente pesate e successivamente miscelate all'interno di un becher di 10L. La miscela con maggiore viscosità viene indicata con "H-type", mentre quella con minore viscosità viene indicata con "L-type".

La posizione del canale può essere variata per ottenere pendenze di 20°, 30° e 40°. Per ogni pendenza gli esperimenti sono stati ripetuti quattro volte per ogni tipo di miscela.

La velocità del flusso è stata misurata usando un metodo basato sull'analisi di immagini digitali acquisite da due videocamere poste rispettivamente di fronte e di lato al canale.

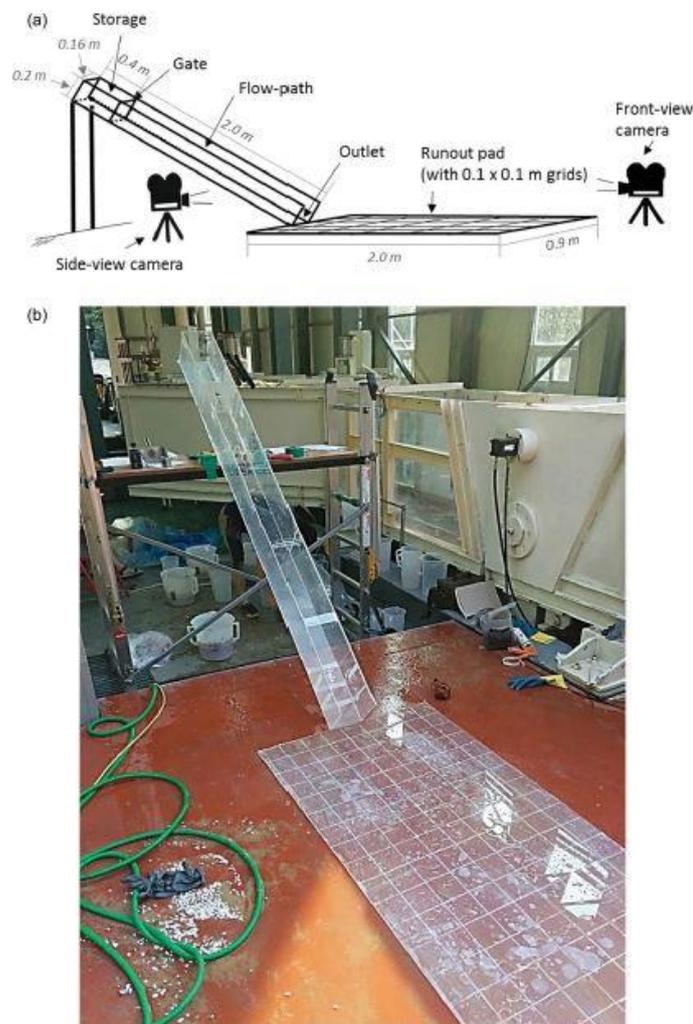


Figura 24: Diagramma schematico (A) e foto (B) del canale sperimentale [32]

2.1.2 Risultati

Dai test effettuati si nota immediatamente come soltanto nel caso di canale inclinato di 30° e 40° il materiale riesce a raggiungere la zona di deposito, mentre nel caso di inclinazione pari a 20° il materiale si ferma lungo il canale. Si evidenzia quindi come la velocità aumenta all'aumentare dell'inclinazione o, viceversa, al diminuire della viscosità del fluido. In particolare si può affermare che il flusso si ferma nel canale inclinato di 20° poiché la sua resistenza a taglio, l'attrito tra le particelle e tra il letto del canale eccedono le forze che governano il moto. Inoltre, è stato dimostrato che ad una maggiore viscosità corrisponde un maggiore attrito tra le particelle interne del fluido, aumentando la

resistenza allo scorrimento. Quindi la miscela H-type con una viscosità maggiore determina velocità minori rispetto alla miscela L-type che porta a velocità elevate a causa della minore viscosità.

Il tipo di miscela, e quindi la sua viscosità, influisce notevolmente anche sulla lunghezza e sullo spessore del deposito. Per la miscela L-type la lunghezza media del deposito è di circa 1000 mm a 30° e 1500 mm a 40°, mentre per la miscela H-type queste lunghezze sono notevolmente inferiori. In **Figura 25** sono riportate lunghezza e spessore misurati ad intervalli di 5 cm. Un altro fattore da evidenziare è il fatto che la miscela H-type forma depositi con spessore maggiore rispetto alla miscela L-type, raggiungendo il valore massimo di spessore nelle zone iniziali del deposito. La lunghezza e lo spessore del deposito sono chiaramente influenzati dalla velocità del flusso (**Figura 26**). Maggiore è la velocità del flusso, maggiore è l'estensione del deposito e minore è il suo spessore. Questi parametri sono così influenzati dalla velocità poiché alte velocità permettono al fronte di coprire grandi distanze.

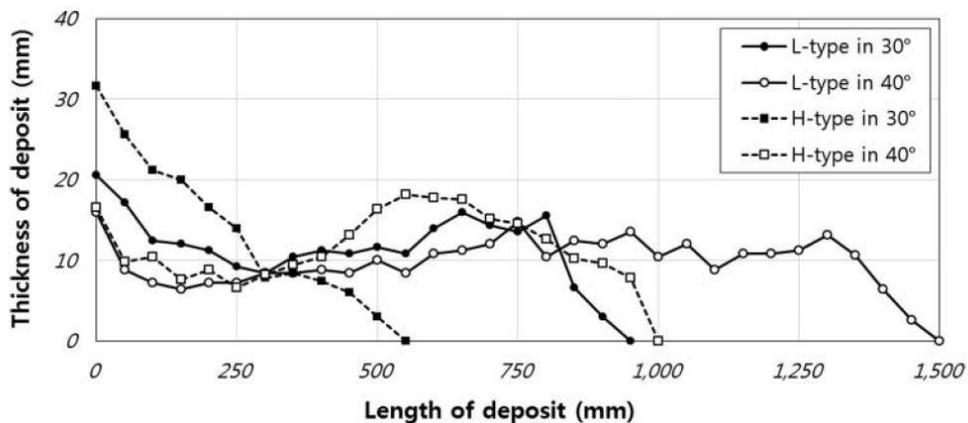


Figura 25: Distribuzione spaziale del deposito in funzione della miscela e della pendenza del canale [32]

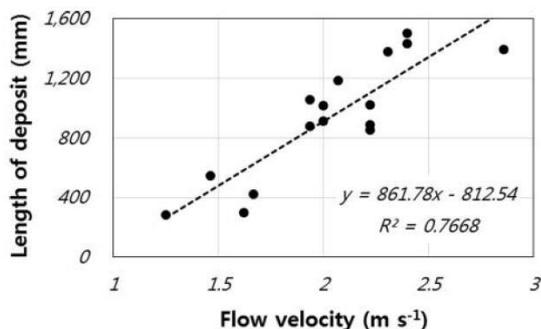


Figura 26: Relazione tra la velocità del flusso e l'estensione del deposito [32]

2.2 ANALISI DEL COMPORTAMENTO IN PRESENZA DI OSTACOLI

Il seguente caso studio ha come scopo quello di simulare e analizzare il comportamento di un debris flow in presenza di ostacoli lungo il suo percorso. Tali ostacoli possono ridurre la velocità del flusso in modo da limitare l'impatto sulle strutture architettoniche a fondovalle. In particolare ostacoli con diverse forme sono stati impiegati per investigare in che modo questi possono influire sulla riduzione della velocità [33].

2.2.1 Configurazione del test

Il modello sperimentale consiste in un canale di lunghezza pari a 6 metri con una sezione rettangolare di 0.45 x 0.40 metri, un serbatoio a monte del canale di 1.2 m³, tre file di ostacoli nella parte finale del canale e un serbatoio di raccolta di 1.2 x 1.2 x 0.8 m ai piedi del canale. Il canale è stato inclinato con una pendenza di 12° e gli ostacoli installati a due terzi della lunghezza del canale (**Figura 27**). Sono stati adottati tre differenti tipi di ostacoli con diverse forme come indicato in **Figura 28** e la spaziatura longitudinale (L) tra di essi può essere variata e imposta pari a 0.10, 0.15 e 0.25 metri, mentre la spaziatura trasversale (D) è mantenuta costante e pari a 0.05 metri.

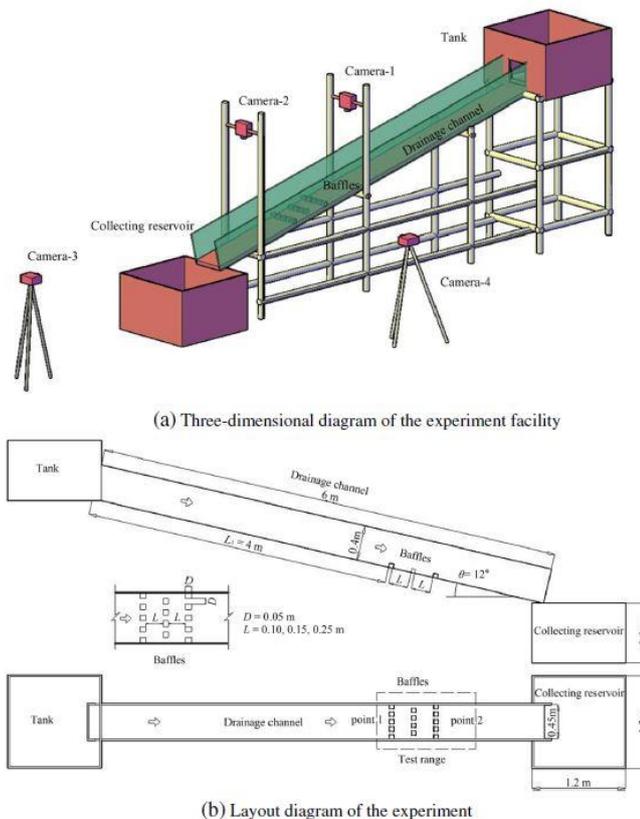


Figura 27: Diagrammi schematici della struttura sperimentale [33]

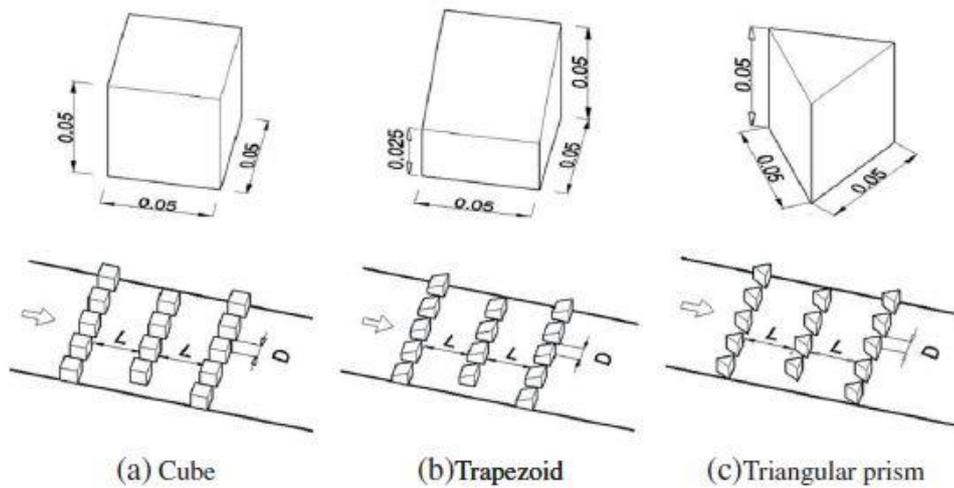


Figura 28: Forme e spaziatura degli ostacoli [33]

Il terreno utilizzato per la simulazione è stato prelevato dalla località di Jiangjia Gully in Cina e la sua curva granulometrica è mostrata in **Figura 29**.

Durante gli esperimenti sono state usate quattro videocamere digitali, due delle quali fisse al di sopra del canale per registrare la velocità superficiale prima e dopo la posizione degli ostacoli, mentre le altre due, posizionate di fronte e lateralmente al canale, sono utilizzate per controllare il movimento e l'altezza del flusso raggiunta in corrispondenza degli ostacoli.

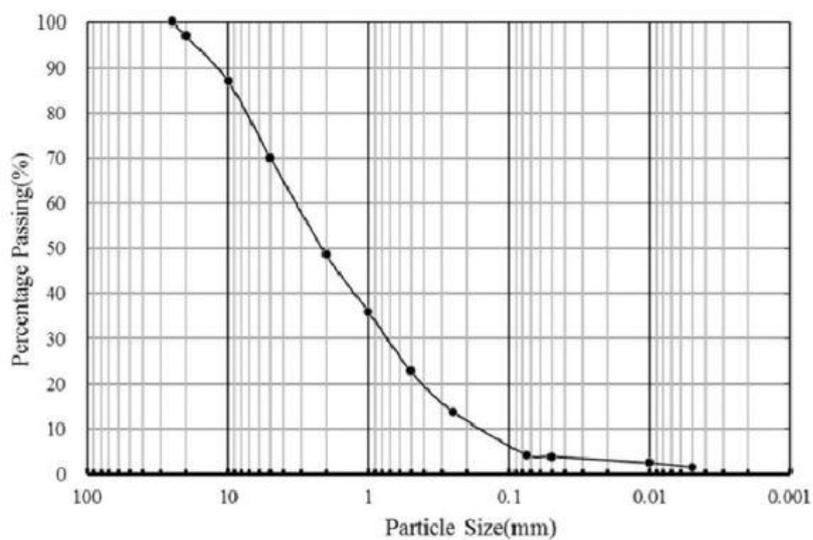


Figura 29: Curva granulometrica del materiale [33]

2.2.2 Risultati

Per tutte le diverse configurazioni di posizione e forma degli ostacoli sono stati eseguiti esperimenti variando la densità del flusso ed analizzando la corrispondente percentuale di riduzione di velocità (n). La **Figura 30a** mostra che la riduzione di velocità per elementi cubici inizialmente aumenta fino a raggiungere un valore del 25% a 1800 kg/m^3 per poi diminuire, mentre per gli elementi trapezoidali (**Figura 30b**) la riduzione di velocità tende ad aumentare all'aumentare della densità del flusso, raggiungendo un picco pari al 26.3% a 2100 kg/m^3 . Un simile andamento viene registrato nel caso di utilizzo di prismi triangolari.

Focalizzandosi sulle diverse spaziature si nota come in linea di massima n gradualmente decresce incrementando la spaziatura da 0.10 a 0.25 m. Questo andamento è presente anche nei risultati delle prove eseguite con gli ostacoli trapezoidali e triangolari. Per questi ultimi il maggior valore di riduzione della velocità (22.5%) si verifica con una spaziatura di 0.1 m e una densità del flusso pari a 2100 kg/m^3 (**Figura 30c**).

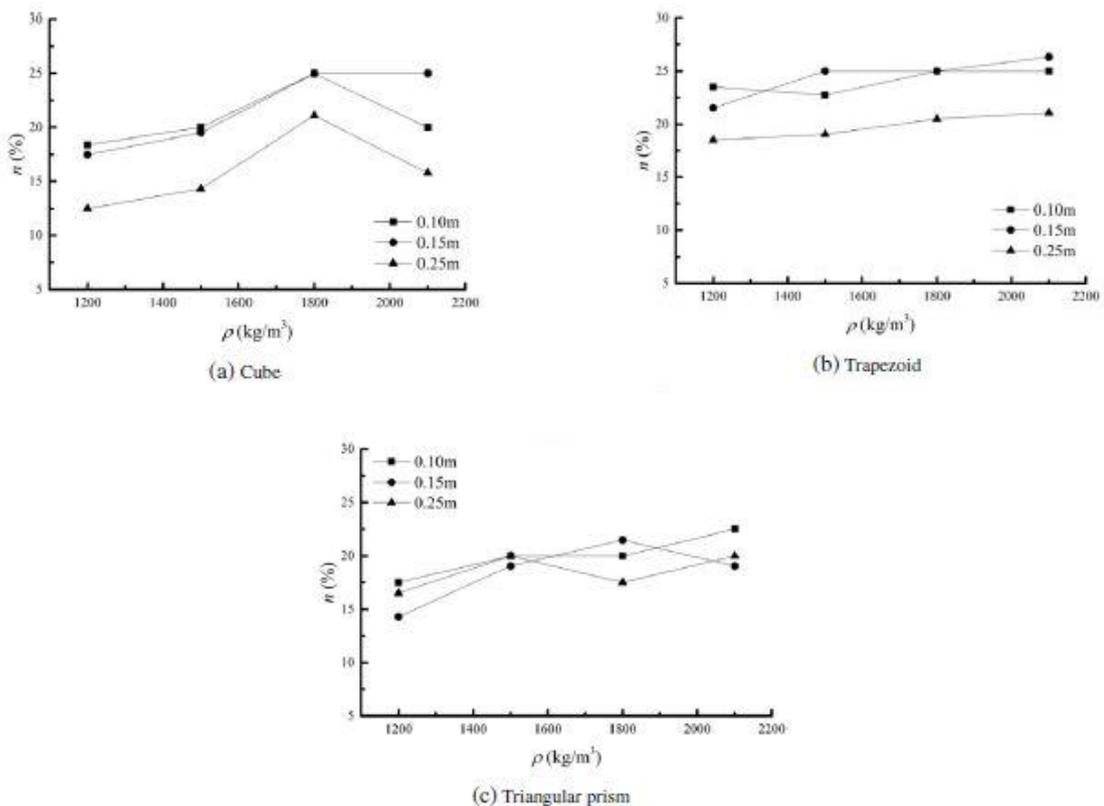


Figura 30: Relazione tra densità e riduzione della velocità per diverse forme degli ostacoli [33]

La forma degli ostacoli influenza quindi la direzione del flusso e a sua volta l'energia dissipata. Gli ostacoli trapezoidali causano una maggiore dissipazione di energia dovuta alla collisione del flusso con una maggiore superficie d'impatto.

2.3 ANALISI DI UN FLUSSO GRANULARE ASCIUTTO

Il caso studio in esame presenta i risultati di un'analisi effettuata attraverso il Metodo agli Elementi Discreti (DEM) con il fine di identificare una correlazione ragionevole tra il reale fenomeno fisico ed i parametri geometrici, meccanici e numerici del DEM. Per questo scopo, il terreno utilizzato è una sabbia asciutta mono-granulare, la quale è particolarmente adatta a simulare flussi come debris flow o valanghe di roccia. Durante ogni test sono stati registrati la geometria della massa, gli spostamenti, le velocità e la forza d'impatto contro un ostacolo posizionato sul percorso del flusso [34].

2.3.1 Configurazione del test

Gli esperimenti sono stati eseguiti su di un canale in plexiglas (**Figura 31**) avente una lunghezza complessiva di 4 metri e una larghezza di 0.5 metri. In particolare il canale è composto da due parti (1.50 metri la parte superiore, 2.50 metri la parte inferiore), le quali possono essere inclinate variabilmente in modo da ottenere diverse configurazioni geometriche. Le sponde del canale sono alte 0.35 metri e realizzate anch'esse in plexiglass trasparente per garantire la visibilità del movimento del flusso durante il test. La sabbia viene posizionata nella parte superiore del canale per una lunghezza di 0.75 metri e un'altezza di 0.1 metri, confinata da una piastra in alluminio. Tale piastra, dopo la rimozione di un apposito perno, è in grado di ruotare con una velocità di 12 rad/s intorno ad un asse rigido, attivando un immediato meccanismo di innesco. Inoltre la scabrezza del letto del canale è stata ottenuta incollando su di esso un sottile strato di sabbia, con le stesse caratteristiche di quella usata per simulare il debris flow.

L'intero processo è stato registrato da videocamere poste al di sopra e lateralmente al canale, le quali hanno permesso di ricostruire il contorno della massa granulare in movimento al fine di valutarne spostamenti e velocità. Per raggiungere questo obiettivo

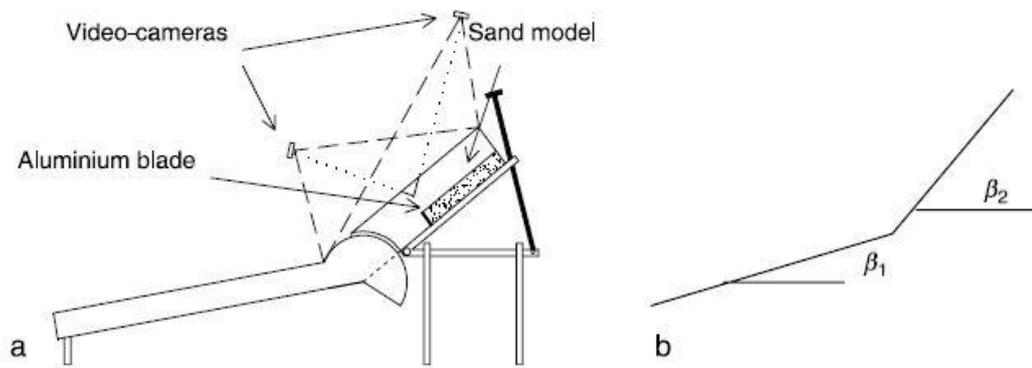


Figura 31: (a) Sezione longitudinale del canale; (b) Configurazione geometrica [34]

è stato utilizzato un metodo basato su di una tecnica fotogrammetrica per acquisire immagini digitali, che ha permesso di mappare in modo automatico gli spostamenti di un gran numero di punti di riferimento. Usando un'apposita griglia, 176 sfere bianche con un diametro di 6 mm, sono state posizionate in modo ordinato sulla superficie del campione. Ogni sfera è stata collegata al terreno tramite un perno di 10 mm, in modo da rimanere integrata alla sabbia durante il movimento. Per migliorare la qualità dell'immagine ed avere un chiaro contrasto tra le sfere di riferimento e lo sfondo, lo strato superficiale del campione di sabbia è stato colorato con un inchiostro nero (**Figura 32**). Ogni test è stato ripetuto quattro volte per stabilire la sua ripetibilità e valutare la validità delle misurazioni. La determinazione delle coordinate delle sfere di riferimento è stata eseguita attraverso una prima fase analitica basata sulla calibrazione delle fotocamere (orientamento interno ed esterno) e successivamente una fase basata su di una stima ai "minimi quadrati" [35].

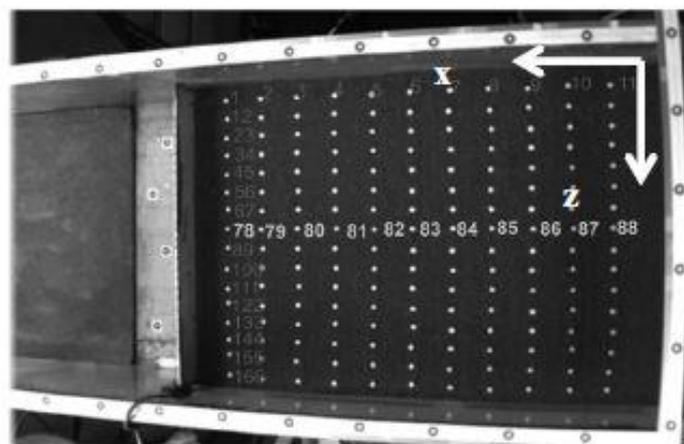


Figura 32: Sfere bianche di riferimento sulla superficie della sabbia [34]

2.3.2 Modellazione numerica

I test eseguiti nel presente caso studio non sono riferiti ad un preciso problema pratico, ma piuttosto ad identificare le principali caratteristiche del fenomeno per valutare la capacità del modello numerico di rappresentare i principali aspetti di un rapido movimento di terreno lungo un pendio. Come già accennato la sabbia si presta bene nella simulazione in piccola scala di debris flow e valanghe di roccia. In questo caso, il terreno impiegato è una sabbia mono-granulare chiamata sabbia del Ticino (**Figura 33**), ben caratterizzata del punto di vista geotecnico e precedentemente già utilizzata in studi di modellazione numerica.

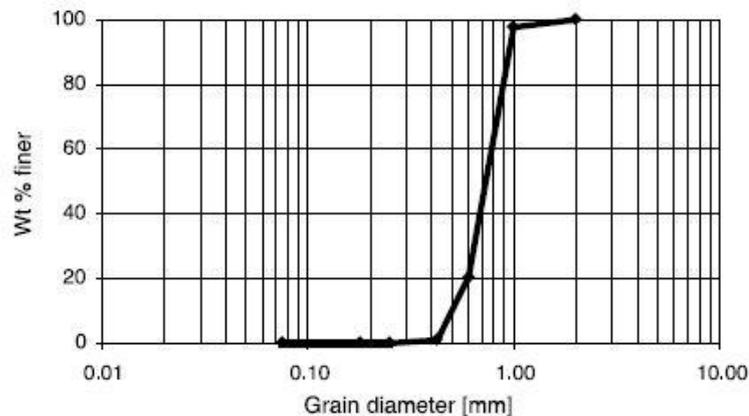


Figura 33: Distribuzione granulometrica della sabbia del Ticino [34]

La simulazione numerica è stata eseguita attraverso la creazione di un modello 2D nel software PFC^{2D}. La forma delle particelle è stata modellata secondo la logica dei “Clump”, che permette di rappresentare il grano grezzo della sabbia del Ticino in modo più naturale ed efficiente. I grani naturali, infatti, raramente sono perfettamente circolari e quindi non rappresentabili attraverso una sfera. D’altra parte, la combinazione di un numero di singole particelle sferiche sovrapposte tra loro permette di costruire un modello più simile alla realtà. Nel caso in esame un numero totale di 19500 particelle elementari è stato modellato, per poi essere unite insieme in un totale di 6500 clump. Il raggio medio delle particelle è di 1.2 mm, spaziando tra 1.1 mm e 1.3 mm. Per determinare il numero e il raggio di tali particelle, è stato assunto un valore di porosità 2D pari a 0.15, corrispondente ad una densità relativa della sabbia del 50%. Infine la geometria del canale è stata generata nel modello numerico con l’uso dell’elemento “Wall”.

I valori dei parametri meccanici, come rigidità normale e tangenziale, sono stati determinati eseguendo una simulazione numerica di una prova triassiale su un campione di dimensioni 100 x 100 mm (**Figura 34**) applicando diverse pressioni di confinamento (0.5, 1.0, 2.0 e 3.0 kPa). Questa prova ha permesso di interpolare l'involuppo di rottura (**Figura 34**), ottenendo un angolo di attrito pari a 32° , corrispondente all'angolo di attrito della sabbia del Ticino misurato sperimentalmente.

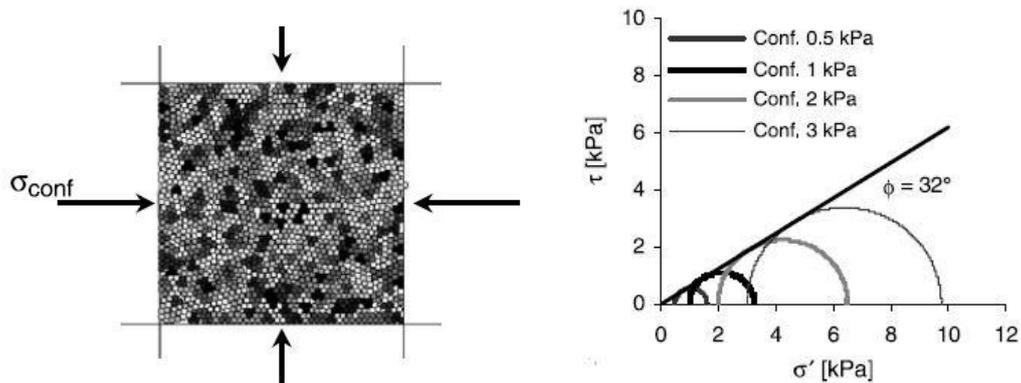


Figura 34: Configurazione di prova triassiale in PFC^{2D} e involucro di rottura [34]

Un ulteriore elemento che si è rivelato molto utile nella validazione del modello numerico è stata la comparazione tra le immagini del test in laboratorio, acquisite dalle videocamere e la simulazione numerica, entrambe riferite ad uno stesso istante di tempo; la configurazione geometrica alla fine del test, quando le particelle sono ferme, è simile tra il caso fisico e quello numerico (**Figura 35**). In aggiunta, come raffigurato in **Figura 36**, anche il profilo del flusso ripreso dalla videocamera attraverso la sponda di plexiglass è molto simile a quello ottenuto mediante la simulazione numerica.

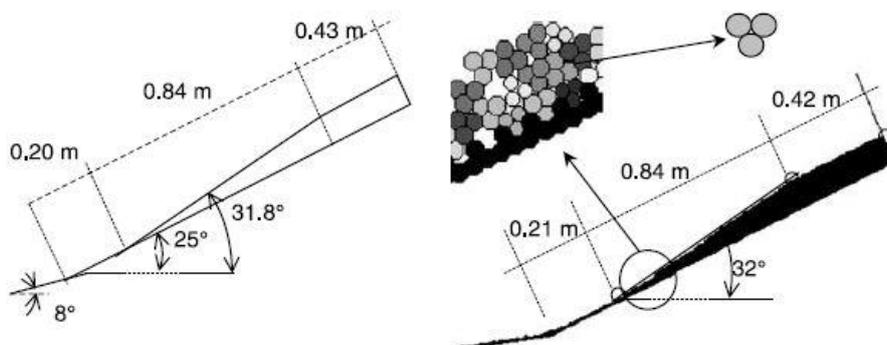


Figura 35: Comparazione tra il modello fisico e quello numerico alla fine del test [34]

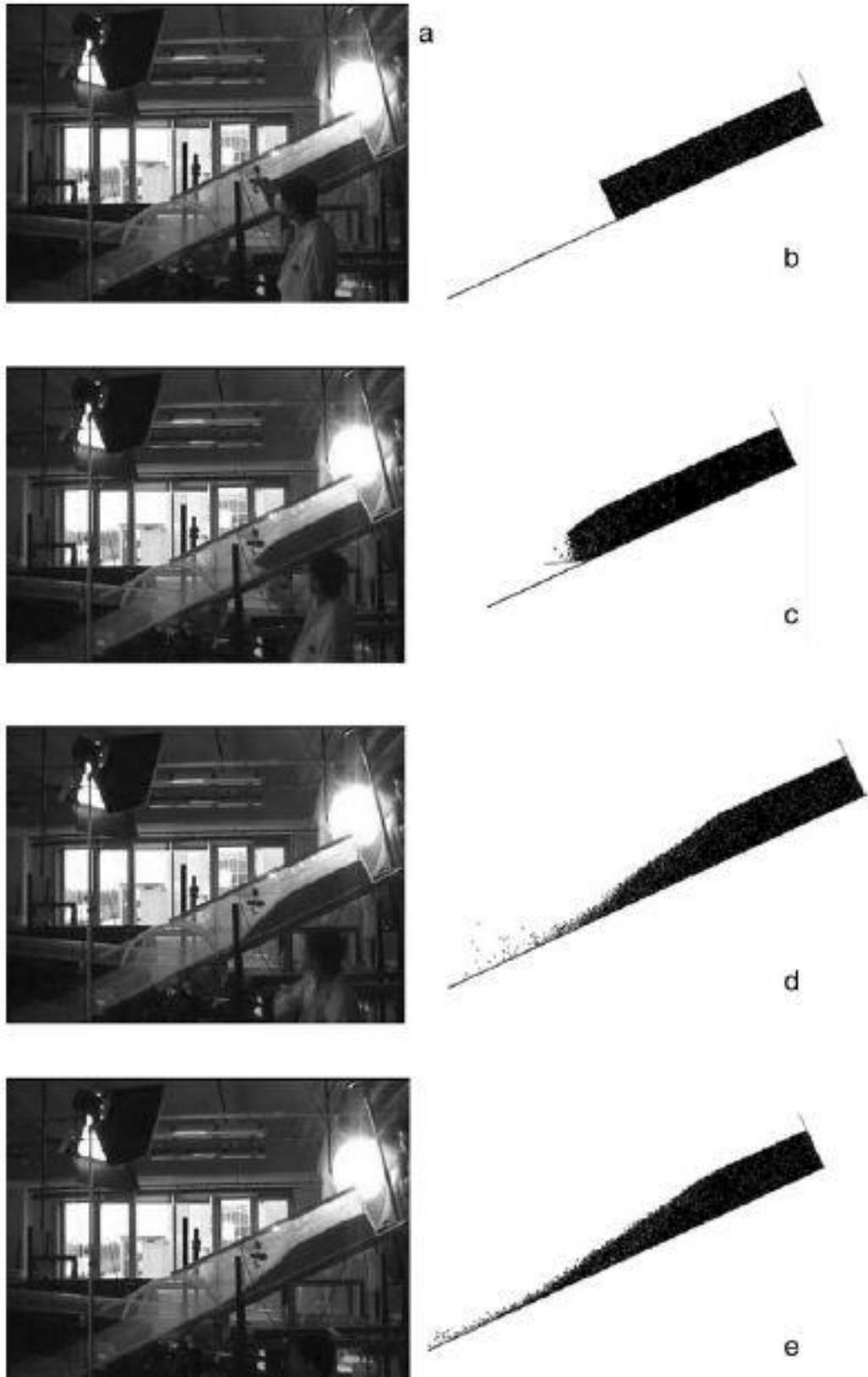


Figura 36: Configurazione geometrica iniziale del modello fisico (a) e di quello numerico (b); sequenza della configurazione geometrica dopo 0.1s (c), 0.5s (d) e 1s (e) dall'innesco [34]

Questi confronti portano alla calibrazione dello smorzamento numerico. Tale parametro, non è strettamente correlato a nessun meccanismo fisico e per questa ragione deve essere ottenuto da un'analisi a ritroso utilizzando i dati sperimentali. In particolare viene introdotto nel software PFC^{2D} in modo da far nascere un'energia “numerica” di dissipazione in aggiunta all'insufficiente dissipazione per attrito, che il modello non riesce a rappresentare in modo adeguato. Quindi un valore di smorzamento diverso da zero causa una diminuzione dell'accelerazione della massa in movimento. Facendo riferimento ad un modello lineare elastico, una collisione perfettamente elastica tra le particelle è possibile soltanto se si assume un valore di smorzamento pari a zero. Tuttavia nella realtà la sabbia usata per eseguire i test non presenta un comportamento perfettamente elastico nei contatti tra le sue particelle e questo giustifica la necessità di considerare un valore di smorzamento diverso da zero durante il movimento.

Gli effetti dello smorzamento sul risultato finale sono stati analizzati effettuando una serie di analisi numeriche con valori di smorzamento rispettivamente di 0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 e 0.05. Il suo effetto appare subito evidente: una piccola variazione dello smorzamento si trasforma in una variazione della forma e della posizione del deposito. Assumendo un valore di smorzamento nullo, le particelle presentano una grande capacità motoria, la quale decresce progressivamente all'aumentare dello smorzamento, sottolineando però che un valore superiore a 0.05 causa un movimento troppo limitato. Un altro aspetto molto importante riguardante lo smorzamento, emerso dai test effettuati, è che questo parametro non sembrerebbe dipendente dalla scala e fa sperare che potrebbe essere usato per effettuare predizioni dopo averlo determinato con un test preliminare.

2.3.3 Forza d'impatto

Nell'ambito dello stesso studio, per investigare la forza d'impatto della massa in movimento, sono stati costruiti e posti all'interno del canale due differenti tipi di ostacoli: il primo è un parallelepipedo di legno con dimensioni di 70 x 50 x 50 mm, mentre il secondo è costituito da una piastra di acciaio che occupa l'intera larghezza del canale (**Figura 37**; e indicati rispettivamente con i termini *small* e *big* in **Figura 38**). In entrambi i casi gli ostacoli sono fissati ad una piccola trave rigida attraverso un collegamento flessibile in alluminio, il quale è equipaggiato con quattro estensimetri. Tale strumento è stato precedentemente calibrato in modo da ottenere una correlazione tra la forza

applicata e la deformazione subita. Una serie di test sono stati effettuati variando la pendenza del canale e la densità relativa della sabbia. I risultati più significativi sono riportati in **Figura 38a** che correla la forza d'impatto sull'oggetto e il tempo, con un'inclinazione del canale di 30° e diverse densità relative della sabbia (0%, 30% e 80%). Inoltre in **Figura 38b** sono riportati i valori della forza d'impatto sui due differenti ostacoli per un valore fissato di densità relativa (50%) quando i due tratti del canale presentano pendenze di 37° e 15° .

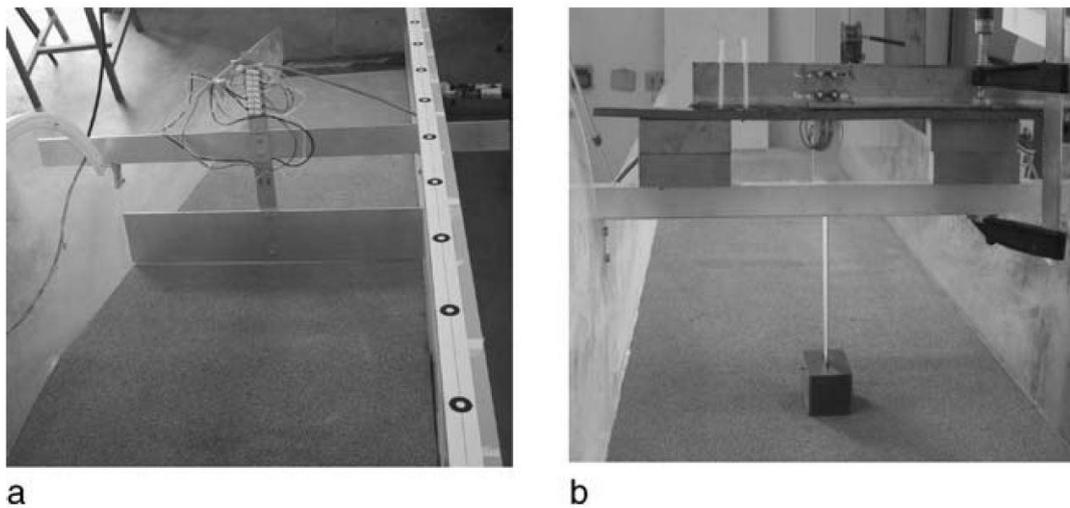


Figura 37: Ostacolo (a) in alluminio e (b) in legno [34]

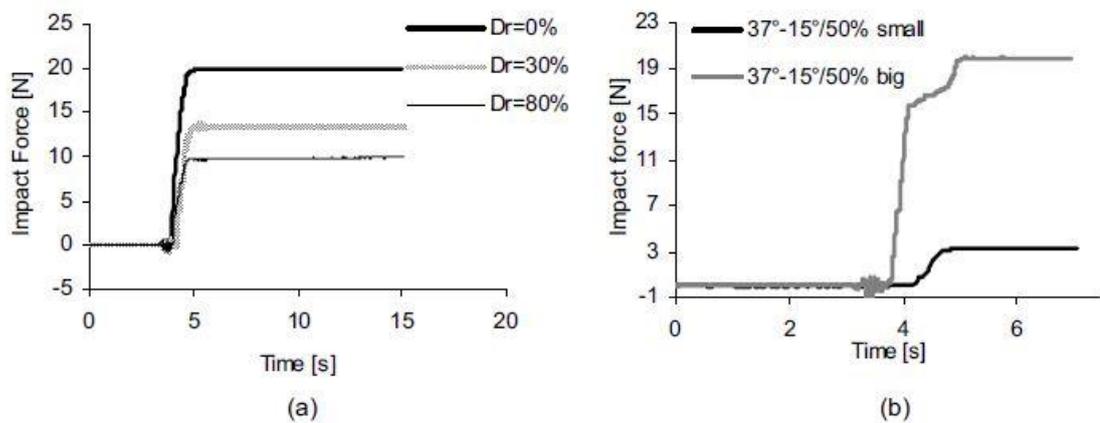


Figura 38: Forza d'impatto vs. tempo (a) per differenti valori di densità relativa e (b) in funzione della forma dell'ostacolo [35]

3 MODELLAZIONE NUMERICA

Quando si affronta un problema geotecnico è possibile usare diversi metodi di risoluzione in base al grado di precisione che si vuole ottenere, alla geometria e alla quantità di dati a disposizione. Questi metodi possono essere divisi in tre categorie:

- **Metodi empirici:** basati sulla conoscenza e le esperienze passate che derivano da problemi simili a quello in esame; consistono principalmente in tabelle e classificazioni.
- **Metodo dell'equilibrio limite:** presuppone di conoscere la geometria del sito in esame. Identificando le discontinuità si delimitano dei blocchi che vengono considerati come corpi rigidi, pertanto non si analizza il processo deformativo, ma ci si focalizza sull'eventuale condizione limite lungo le superfici di rottura. Il metodo richiede la conoscenza e il confronto delle forze agenti sui blocchi e le forze resistenti.
- **Metodi delle tensioni:** conoscendo le proprietà di resistenza e deformabilità del sistema in esame, questi metodi calcolano l'evoluzione del processo deformativo e la variazione dello stato tensionale. Per questo tipo di analisi vengono utilizzati sia metodi analitici sia metodi numerici.

I metodi di modellazione numerica sono, ad oggi, i metodi più utilizzati, poiché permettono di simulare il processo tenso-deformativo del sistema in esame con adeguata precisione anche in condizioni non lineari del problema (per esempio equazioni non lineari da risolvere, dominio non omogeneo o leggi costitutive dei materiali non lineari). Esistono diversi approcci di analisi numerica che si possono classificare in due grandi gruppi: i metodi del continuo e i metodi del discontinuo. Del primo gruppo fanno parte il Finite Element Method (FEM), il Boundary Element Method (BEM) e il Finite Difference Element Method (DEM), mentre al secondo gruppo appartiene il Discrete Element Method (DEM). La differenza sostanziale tra i due gruppi sta nel fatto che nel primo caso gli elementi del dominio, pur deformandosi, rimangono sempre in contatto tra di loro, mentre nel secondo caso gli elementi possono staccarsi o creare nuovi contatti.

3.1 METODO AGLI ELEMENTI DISCRETI

Il Metodo agli Elementi Discreti (DEM) è un metodo di modellazione numerica dove il dominio viene rappresentato come un insieme di corpi distinti (blocchi o particelle) che interagiscono tra di loro mediante punti di reciproco contatto. La caratteristica principale del DEM è l'abilità di riprodurre spostamenti finiti o rotazioni degli elementi, i quali possono essere schematizzati sia come corpi rigidi sia come corpi deformabili. Questo permette la formazione di nuovi contatti tra corpi inizialmente separati, o viceversa, la separazione di blocchi inizialmente in contatto tra di loro.

Il DEM consente di identificare la risposta del sistema ad un processo dinamico fino a raggiungere l'equilibrio quando le sollecitazioni interne al sistema sono bilanciate. La risoluzione del problema avviene mediante un approccio esplicito, dove, per successivi time-step, vengono scritte le equazioni del moto per ogni corpo del sistema, le quali vengono utilizzate per ricavare forze e spostamenti prodotti nei punti di contatto, e le equazioni costitutive, le quali definiscono il legame tra sforzi e deformazioni. Quindi le equazioni del moto e le equazioni costitutive vengono risolte all'interno di un determinato time-step, assumendo che le velocità e le accelerazioni siano costanti all'interno di questo intervallo temporale. Inoltre, il time-step deve essere sufficientemente piccolo in modo tale che le perturbazioni non possano propagarsi da un elemento a quelli nelle immediate vicinanze.

Lo schema dei passaggi di un approccio esplicito del DEM è il seguente:

1. Per ogni time-step vengono determinate le forze di contatto (incognite) in ogni elemento a partire dalle condizioni note al contorno;
2. Le equazioni del moto vengono integrate per determinare i nuovi valori di velocità e spostamento, basati sulle forze applicate;
3. Dai valori di velocità vengono determinate le nuove deformazioni;
4. A partire dai nuovi valori di deformazione e usando le equazioni costitutive, vengono calcolate le tensioni. Integrando questi valori si otterranno nuove forze e quindi si procederà in modo iterativo (**Figura 39**).

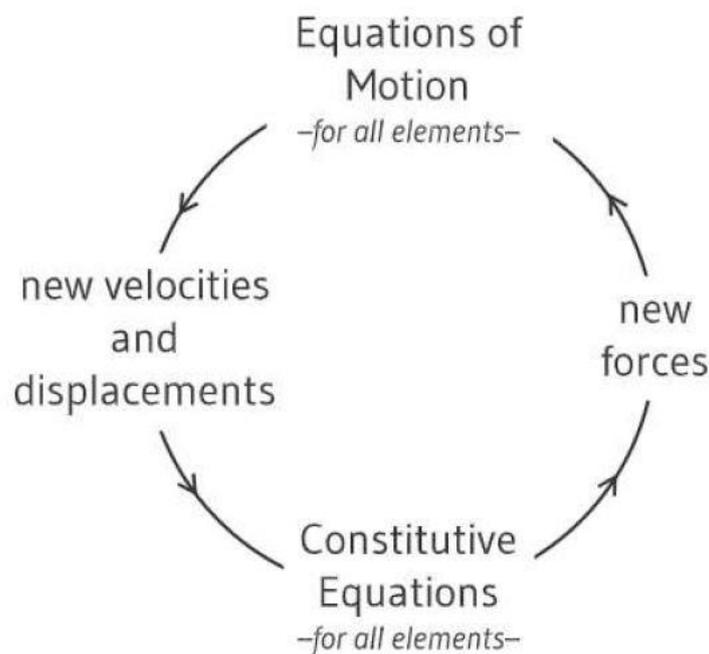


Figura 39: Fasi di calcolo con approccio esplicito [36]

3.1.1 Il DEM particellare

Il DEM particellare schematizza gli elementi che compongono il sistema come particelle di diverse dimensioni ed è particolarmente indicato per la modellazione di materiali granulari, come terreni con una certa distribuzione granulometrica. Il sistema viene quindi schematizzato come un assemblaggio di particelle circolari rigide in contatto tra di loro in un singolo punto. Per simulare contatti deformabili, essendo le particelle schematizzate come corpi rigidi, questo metodo ammette una sovrapposizione delle particelle in corrispondenza dei punti di contatto (aree di dimensioni trascurabili). Questi contatti possono essere schematizzati come molle aventi rigidità normale e tangenziale.

Trattandosi di un metodo agli elementi discreti, ogni particella si comporta come corpo fisicamente separato dagli altri. Il metodo permette però di creare legami, detti *bond*, tra due particelle: queste si comporteranno come un unico corpo finché non viene raggiunto il limite di rottura. I legami possono essere in grado di resistere a trazione, compressione, taglio, torsione e flessione e la loro resistenza viene solitamente descritta mediante una legge elastica perfettamente plastica. Una volta rotto il legame, le particelle si comportano come mezzi separati.

Nonostante tutte le particelle siano assunte di forma circolare, è possibile eseguire l'analisi numerica di un mezzo che presenta anche delle particelle di forma differente da quella circolare. Infatti, il metodo permette di creare delle "super-particelle", costituite da un insieme di n-particelle, di forma arbitraria, dette *clump*. I contatti tra le particelle che costituiscono un clump sono infinitamente rigidi, pertanto il corpo si comporta come mezzo rigido.

Un ulteriore elemento, che può essere utilizzato nel DEM particellare, è l'elemento parete, detto *wall*. Questi elementi sono utili a definire le condizioni al contorno del dominio, in quanto il loro movimento è indipendente dalle forze di contatto che agiscono su di essi. Gli elementi parete sono elementi infinitamente rigidi, ma posso sviluppare delle forze tramite il contatto con le particelle.

La risoluzione di un problema con il DEM è governata da tre parametri (rigidezza normale e tangenziale e attrito), detti micro-parametri, che definiscono l'interazione tra due particelle. I micro-parametri non possono essere determinati da test in laboratorio, ma è necessaria un'analisi numerica per la loro calibrazione. Questo aspetto rappresenta uno dei principali svantaggi nell'uso del DEM.

4 REALIZZAZIONE DEL MODELLO FISICO A SCALA DI LABORATORIO

Con lo scopo di effettuare analisi numeriche e testare la potenzialità della fibra ottica come sensore per il monitoraggio di debris flows, è stata avviata una campagna sperimentale presso il Laboratorio Geotecnico del Politecnico di Torino. A tal proposito è stato realizzato un modello fisico per simulazioni di debris flows.

Questo modello fisico è essenzialmente un canale con sezione ad “U” e per la sua realizzazione sono stati presi in considerazione tre diversi tipi di materiale: legno, plexiglass e metallo. La realizzazione del canale interamente in legno è risultata la più economica, tuttavia presentava degli svantaggi come l’elevato peso e l’impossibilità di monitorare il profilo della colata durante le simulazione a causa della non trasparenza delle sponde. Al contrario la realizzazione del canale interamente in plexiglass non presentava particolari svantaggi, se non l’elevato prezzo. L’idea della realizzazione in metallo, invece, è stata la prima ad essere scartata poiché, nonostante il prezzo contenuto, il canale sarebbe stato affetto da forti vibrazioni durante le simulazioni. Queste vibrazioni avrebbero potuto causare rumore e disturbi del segnale in eventuali simulazioni con fibra ottica. La soluzione ottimale è stata trovata andando a comporre il canale con diversi tipi di materiale, ovvero legno e plexiglass.

Il canale è quindi costituito da una base in legno e sponde in plexiglass e si compone di due parti rettilinee, le quali possono essere inclinate per ottenere configurazioni geometriche differenti (**Figura 40**). I pannelli che costituiscono la base sono realizzati in multistrato fenolico, un semilavorato a strati di legno posti uno sull’altro e incollati tra loro con resine fenoliche, dalle quali prende il nome. La struttura a strati (**Figura 41**) e i collanti conferiscono al materiale rispettivamente una buona robustezza e una discreta resistenza all’acqua e agli agenti atmosferici. Le sponde invece sono realizzate in plexiglass trasparente per garantire la visibilità del materiale in movimento all’interno del canale.

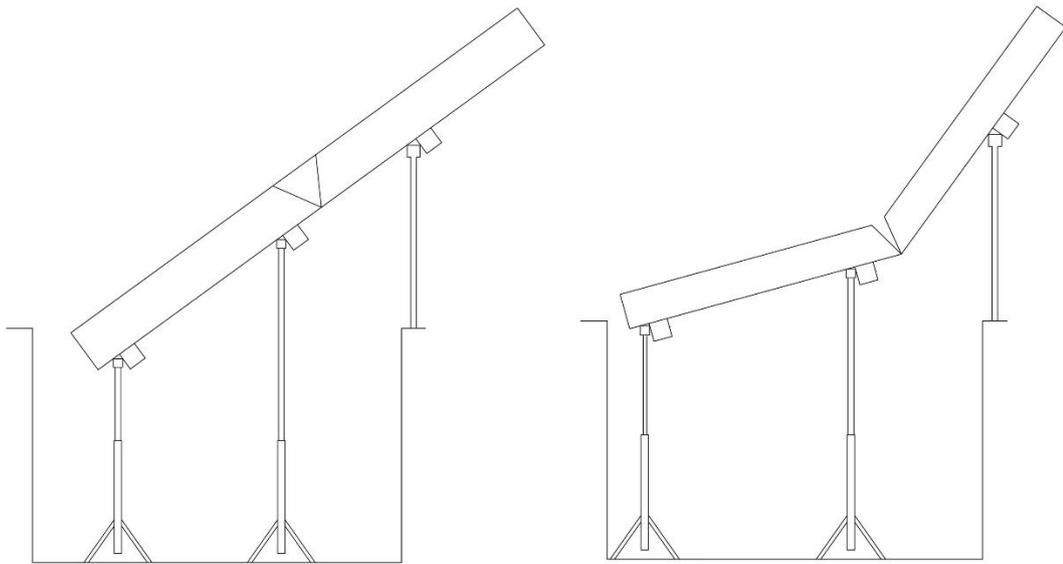


Figura 40: Configurazioni geometriche del canale: lineare e a doppia pendenza



Figura 41: Struttura a strati del pannello in multistrato fenolico



Figura 42: Sistema di cerniere

I pannelli in multistrato fenolico hanno uguali dimensioni (1.5 m x 0.7 m x 0.018 m) e prevedono un sistema di cerniere (**Figura 42**) sul lato corto per essere uniti tra loro in modo da formare un'unica tavola di lunghezza complessiva pari a 3 metri (**Figura 42**). I pannelli sono stati tagliati su misura dalla “Falegnameria Mirarchi”, la quale ha provveduto anche alla predisposizione delle cerniere.

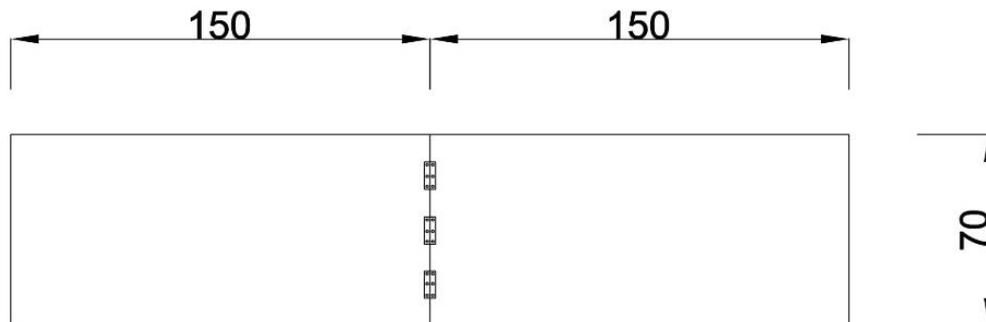


Figura 43: Schema dei pannelli uniti mediante sistema di cerniere (misure in cm)

Per ogni pannello sono previste delle sponde in plexiglass da fissare sul lato lungo. Tali sponde si presentano con una forma trapezoidale con le basi maggiore e minore rispettivamente di 1.50 m e 1.36 m. L'altezza misura 0.25 m e l'angolo tra la base maggiore e il lato obliquo è pari a 60° (**Figura 44** e **Figura 45**). Questa forma permette, una volta uniti i due pannelli, di lasciare uno spazio vuoto tra le sponde del primo e del secondo. In questo modo la pendenza può essere variata senza che le sponde si tocchino e vadano ad impedire il movimento di apertura o chiusura del canale pannello (fare riferimento alla **Figura 40**). Nella configurazione lineare lo spazio vuoto che si crea tra due sponde successive ha la forma di un triangolo equilatero con lati di 0.29 m. Pertanto è stato realizzato un cuneo in plexiglass (

Figura 46), con queste dimensioni, da inserire tra le sponde del canale soltanto nella configurazione lineare, ottenendo così un'unica sponda di forma rettangolare di lunghezza complessiva 3 m e altezza 0.25 m (**Figura 47**). Tutte le componenti in plexiglass hanno uno spessore di 0.01 m e sono state realizzate dalla ditta “Plasti Print”, ditta specializzata in lavorazioni di materie plastiche.

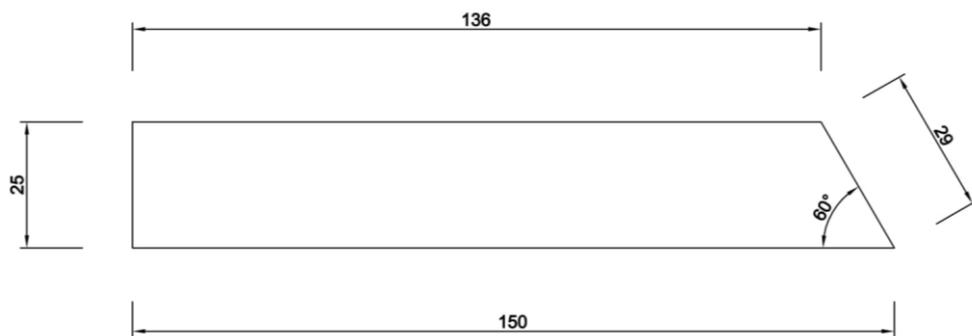


Figura 44: Schema delle sponde in plexiglass (misure in cm)



Figura 45: Sponda in plexiglass

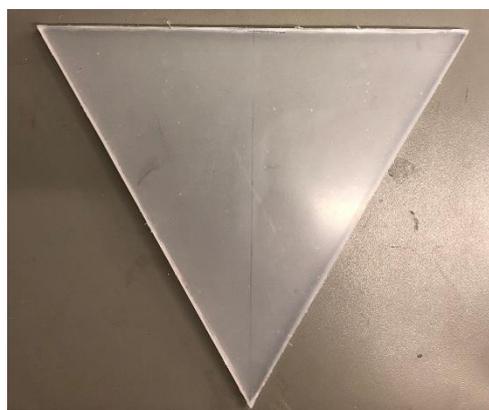
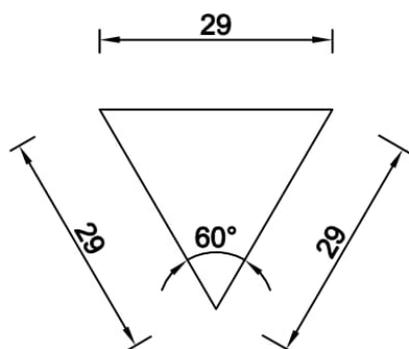


Figura 46: Schema e foto del cuneo in plexiglass (misure in cm)

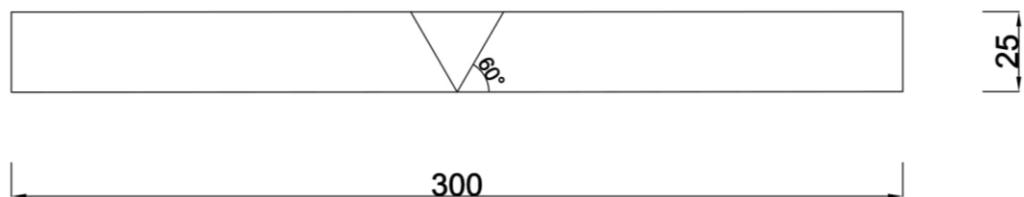


Figura 47: Schema della sponda in configurazione lineare (misure in cm)

Ogni sponda in plexiglass è stata fissata alla base in legno mediante 3 squadrette angolari in alluminio con sezione ad L; la ali di tali elementi sono di uguale lunghezza pari a 10 cm (**Figura 48**). Per tenere insieme tutti gli elementi, ogni squadretta angolare è stata fissata con quattro bulloni di diametro pari a 5 mm.



Figura 48: Squadretta angolare per il fissaggio delle sponde

Il canale completamente assemblato, viste le sue dimensioni, è posizionato in una zona del laboratorio dove è presente uno scavo a partire dal piano del pavimento. La pianta dello scavo ha forma quadrata con dimensioni di circa 2 m x 2 m e scende per una profondità di circa 1.30 m. All'interno dello scavo sono state realizzate due strutture per sostenere il canale. Ogni struttura è composta da 3 tubi innocenti, due con lunghezza di circa 2 m posti verticalmente e uno più corto (circa un metro) posto orizzontalmente tra i primi due. I tubi sono collegati e fissati tra loro da dei morsetti, mentre l'intera struttura

trova equilibrio e scarica il proprio peso su dei treppiedi (**Figura 49**). Questo sistema permette di variare facilmente la posizione e la pendenza del canale andando ad alzare (o abbassare) i tubi posti in posizione orizzontale. Come terzo elemento di sostegno è stato utilizzato il parapetto in metallo disposto lungo il perimetro dello scavo.

Infine, nella parte inferiore del canale sono stati fissati dei travetti in legno di pioppo con sezione quadrata (0.10 x 0.10 m) e lunghezza uguale alla larghezza del canale (0.70 m). Questi travetti, appoggiandosi sul parapetto e sulle due strutture a tubi innocenti, impediscono lo scivolamento del canale verso l'interno dello scavo (**Figura 50 e Figura 51**).

L'intero sistema, così come descritto, presenta inoltre il grande vantaggio di poter essere disassemblato e assemblato di nuovo con facilità in ogni momento, permettendo così il suo trasporto e il suo eventuale utilizzo in ambienti esterni al laboratorio.

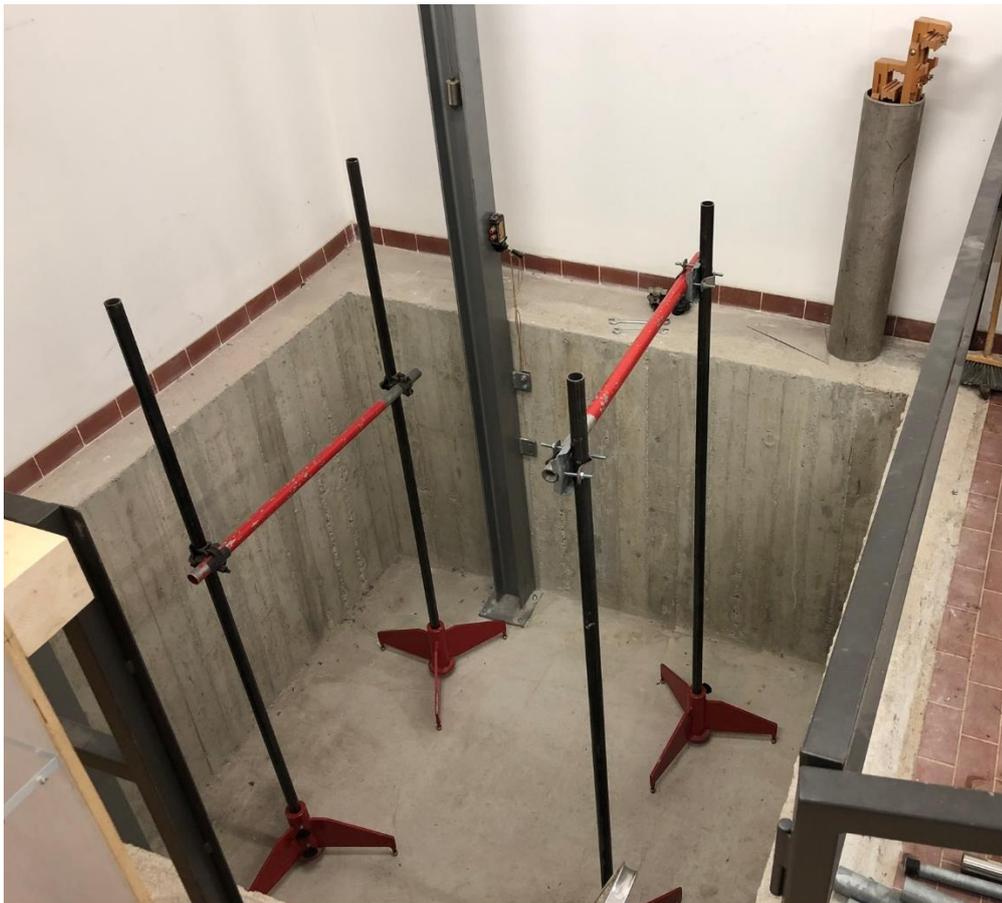


Figura 49: Struttura a tubi innocenti per il sostegno del canale

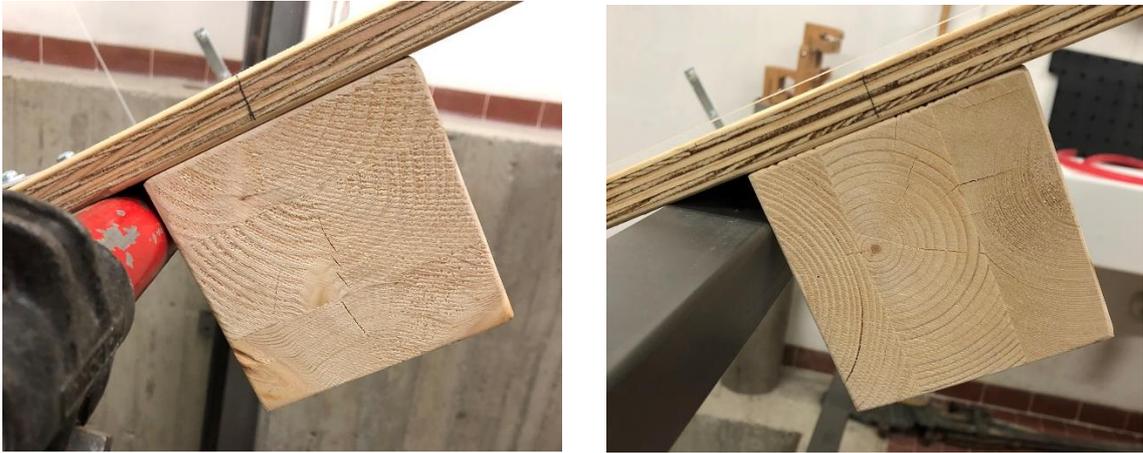


Figura 50: Travetti appoggiato sulla struttura a tubi innocenti (a sinistra) i e sul parapetto (a destra)

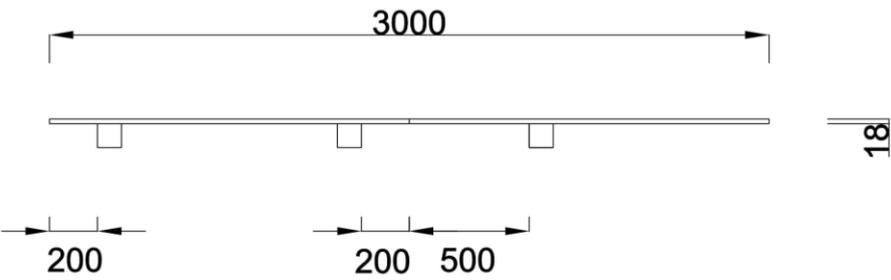


Figura 51: Schema di disposizione dei travetti (misure in mm)

In **Figura 52** viene mostrato il canale assemblato e posizionato.



Figura 52: Canale assemblato e posizionato

5 SPERIMENTAZIONE IN LABORATORIO

La sperimentazione in laboratorio gioca un ruolo fondamentale per confrontare le simulazioni in scala e i dati monitorati da un sistema di fibre ottiche distribuite con i risultati ottenuti dalle analisi numeriche attraverso il Metodo agli Elementi Discreti (DEM). Pertanto sono realizzati esperimenti sistematici che coinvolgono il movimento e il rotolamento di oggetti di diverse dimensioni all'interno del canale con la finalità di validare il modello numerico e individuare i micro-parametri che governano il problema.

La sperimentazione in laboratorio prevede di distribuire un cavo di fibra ottica all'interno del canale con una disposizione a forma di "S" e far rotolare provini cilindrici di diverse dimensioni e materiale al fine di individuarne il passaggio mediante la variazione di polarizzazione della luce.

5.1 SET-UP DELL'ESPERIMENTO

La sperimentazione viene condotta tramite l'utilizzo del canale descritto nel Capitolo 4, il quale presenta una lunghezza complessiva di 3 metri e una pendenza di 30° . Un cavo di fibra ottica è disposto al suo interno in modo da coprire l'intera sezione trasversale in tre punti (**Figura 53**). In ognuna delle tre sezioni, per mantenere il cavo teso, esso è stato fissato con del nastro adesivo per l'intera lunghezza trasversale (**Figura 54**). Le tre sezioni presentano una distanza dalla parte sommitale del canale rispettivamente di 84 cm, 220 cm e 300 cm.

I due estremi del cavo sono collegati rispettivamente ad un laser e ad un analizzatore di polarizzazione (Novoptel PM1000, **Figura 56**), attraverso il quale viene costantemente monitorata la polarizzazione della luce all'interno della fibra con lo scopo di registrare il movimento di oggetti all'interno del canale. Per mezzo del rotolamento di provini cilindrici si vogliono causare delle variazioni di polarizzazione quando questi passano nelle sezioni trasversali nelle quali è disposta la fibra.

In questo modo si cerca di valutare il momento esatto del passaggio del provino in tutte le sezioni e derivarne così la sua velocità (**Figura 55**).

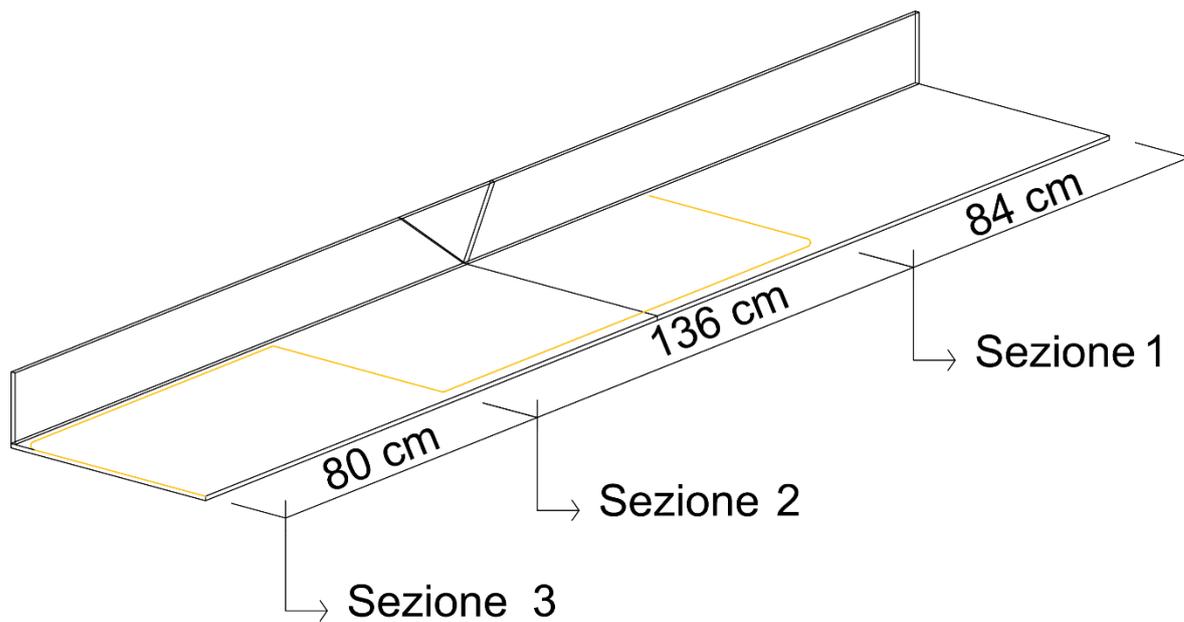


Figura 53: Schema della disposizione della fibra ottica (in giallo)



Figura 54: Disposizione della fibra fissata in tre sezioni trasversali

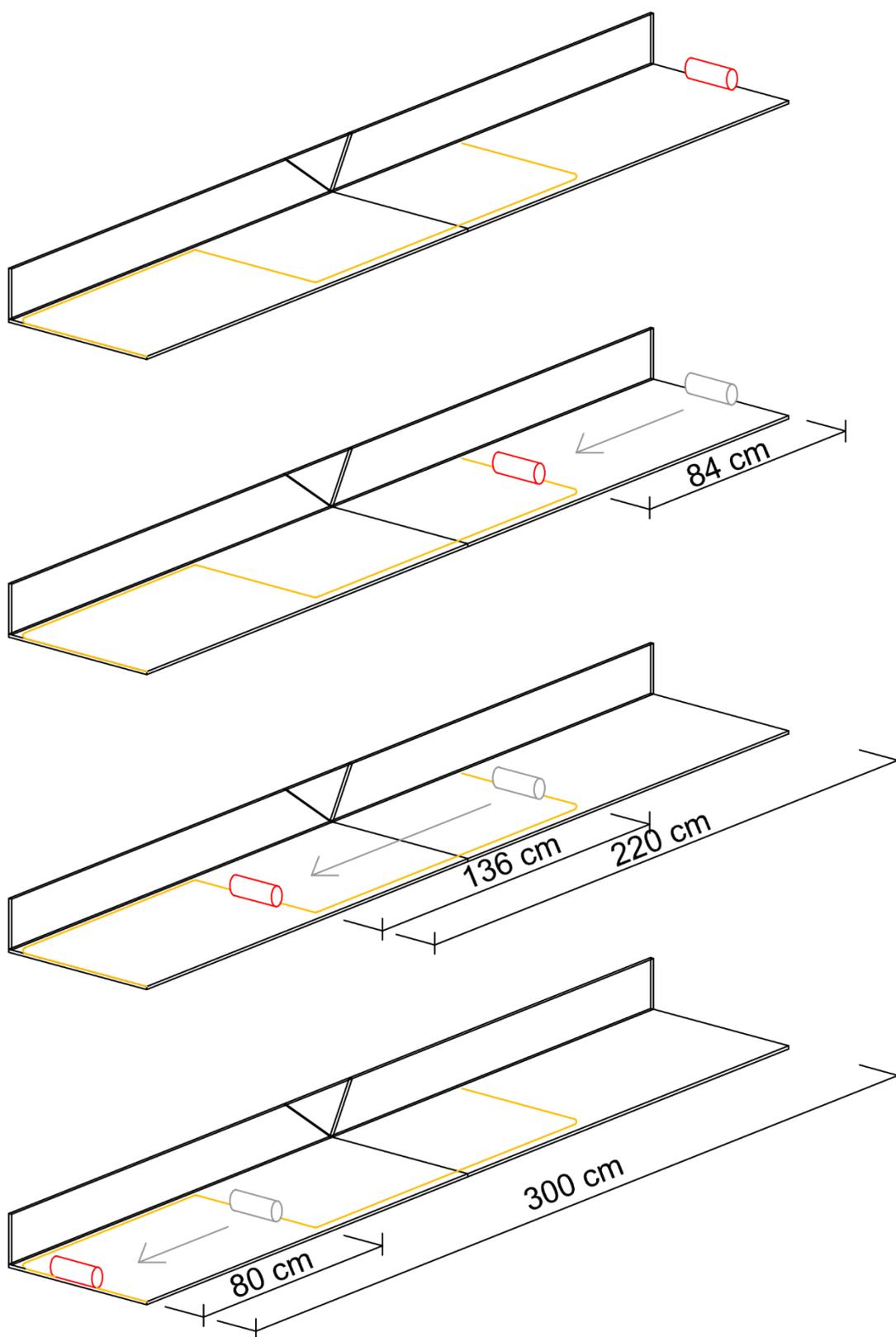


Figura 55: Schematizzazione dei test effettuati



Figura 56: Analizzatore di polarizzazione Novoptel PM1000 [31]

5.2 ANALISI DEI DATI DERIVANTI DELLE SIMULAZIONI

I dati registrati dall'analizzatore di polarizzazione vengono salvati in formato .BIN e possono essere plottati nel software MATLAB per mezzo della funzione “*pm1000plotbinary*” [31]. Tale funzione permette di graficare l'andamento dei tre parametri di Stokes in funzione del tempo. Attraverso una secondo codice [25] è possibile derivare, dai dati registrati, i valori di spostamento e velocità angolare riferiti alla variazione dello stato di polarizzazione sulla sfera di Poincarè (cfr. Capitolo 1.5.1.1).

I test sono condotti con l'utilizzo di quattro diversi provini cilindrici e di seguito vengono analizzati i dati derivanti dalle simulazioni.

5.2.1 Provino cilindrico in gomma

Il primo test viene effettuato con un provino cilindrico in gomma e le sue caratteristiche sono elencate in **Tabella 5**.

Tabella 5: Caratteristiche del provino in gomma

Massa	
257.7 g	
Altezza	
101.5 mm	
Diametro	
50.8 mm	

Da una prima analisi dell'oscilloscopio e dei parametri di Stokes non risulta nessuna variazione che potrebbe far pensare al passaggio del provino nelle tre sezioni del canale nelle quali è disposta la fibra; si nota però un picco significativo nel grafico della velocità angolare (**Figura 57**). Individuando questo picco, ad un tempo di 0.87 secondi (**Figura 58**), e andando a esaminare in dettaglio i tre parametri di Stokes a questo tempo, si osservano delle piccole variazioni repentine in ognuno dei tre parametri (**Figura 59**). Tuttavia, questo picco non permette di identificare a quale delle tre sezioni si riferisca, non avendo altri dati significativi a disposizione. Infatti, anche andando ad individuare tutti i picchi nel grafico della velocità angolare (**Figura 60**), ed analizzando i parametri di Stokes ai rispettivi tempi (**Figura 61**), non emergono variazioni rilevanti. Infine, focalizzandosi sulla parte dell'oscilloscopio dopo il tempo di 1.5 secondi, si notano delle ampie oscillazioni (**Figura 57**), le quali potrebbero essere attribuite alle oscillazioni, al termine della simulazione, delle parti di fibra ottica non fissate al canale.

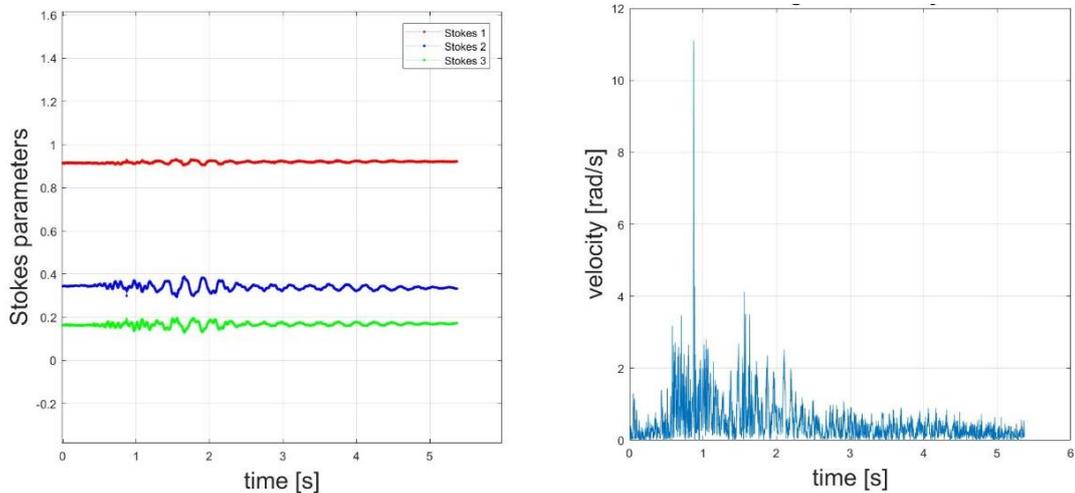


Figura 57: Parametri di Stokes e velocità angolare della simulazione con provino in gomma

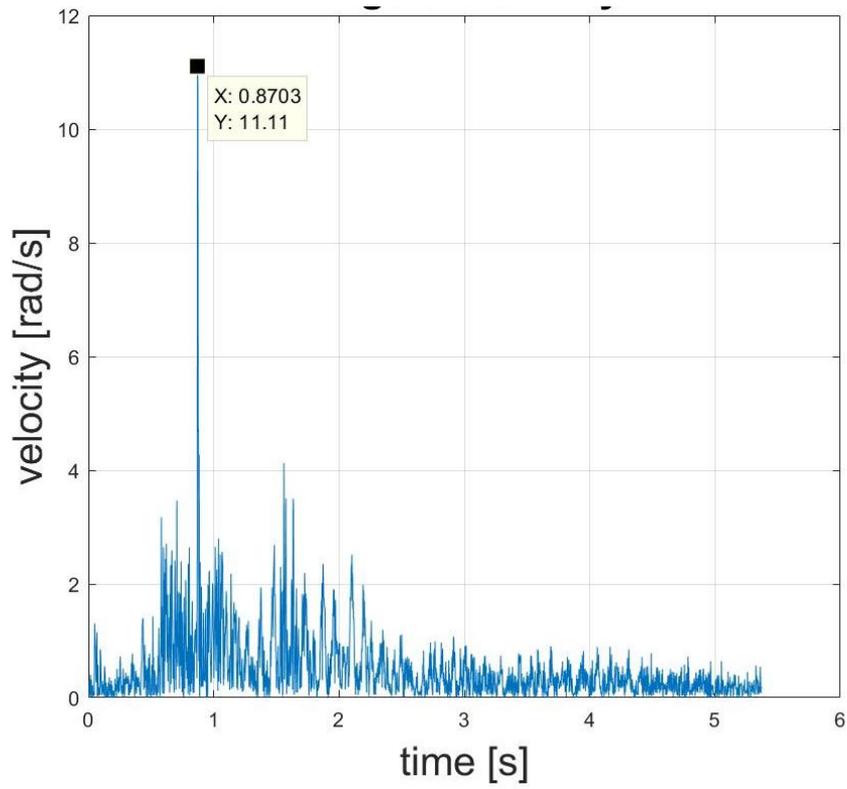


Figura 58: Coordinate del picco di velocità angolare nella simulazione con provino in gomma

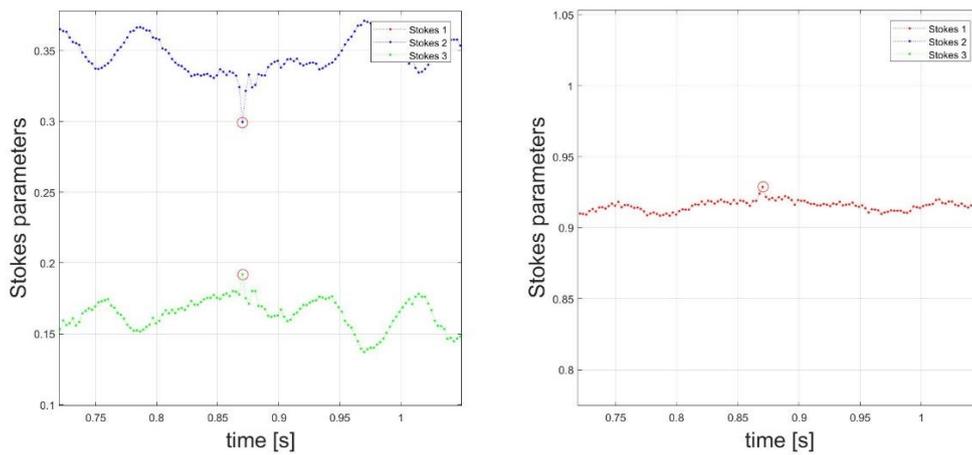


Figura 59: Dettaglio dei parametri di Stokes al tempo di 0.87 s nella simulazione con provino in gomma

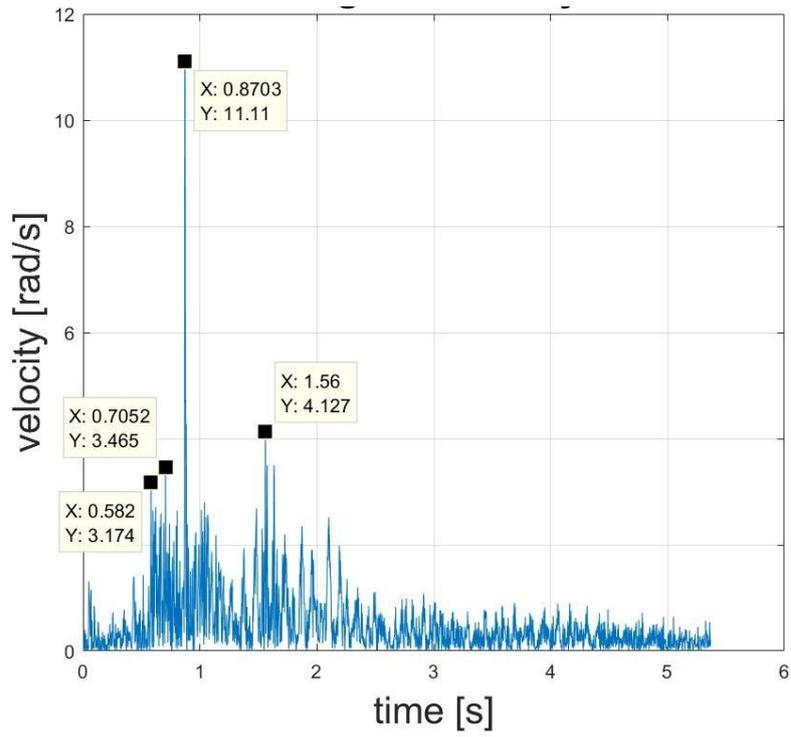


Figura 60: Coordinate dei picchi principali della velocità angolare nella simulazione con provino in gomma

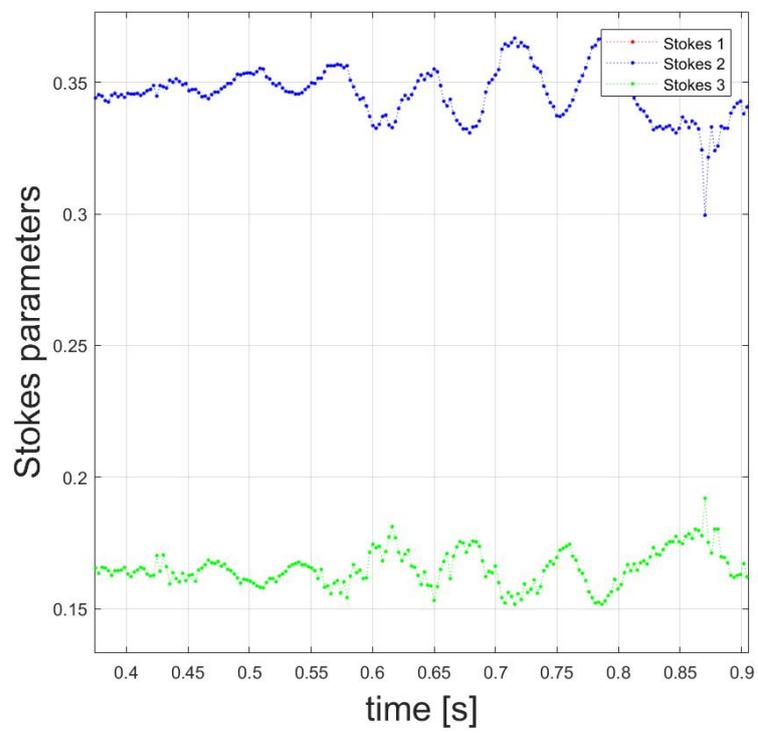


Figura 61: Dettaglio dei parametri di Stokes s_2 e s_3 in corrispondenza dei picchi principali della velocità angolare (tempi 0.58 s, 0.71 s e 0.87s) nella simulazione con provino in gomma

È importante notare anche come, la variazione dei parametri di Stokes in corrispondenza del tempo di 0.87 secondi, è comunque più piccola delle oscillazioni finali e quindi impossibile da rilevare da un algoritmo per il riconoscimento dei segnali che evidenziano l'occorrenza di un evento.

Il risultato poco significativo di questo test è da attribuirsi pertanto alla piccole dimensioni del provino ed al suo peso, cause per le quali il campione non riesce a provocare importanti variazioni di polarizzazione della luce all'interno della fibra.

Si è deciso così di lasciare da parte questo tipo di campione e proseguire la sperimentazione con altri tipi di provini.

5.2.2 Provino cilindrico in teflon

Una nuova serie di test viene effettuata facendo rotolare all'interno dello scivolo un provino cilindrico in teflon, le cui caratteristiche sono indicate in **Tabella 6**.

Tabella 6: Caratteristiche del provino in teflon

Massa	
891.9 g	
Altezza	
161.0 mm	
Diametro	
70.8 mm	



Il primo test evidenzia subito come le maggiori dimensioni del provino abbiano portato alla comparsa di un numero maggiore di picchi, sia nell'oscilloscopio sia nel grafico della velocità angolare (**Figura 62**). In particolare si evidenziano due elevati valori di velocità angolare ai tempi di 0.91 secondi e 1.11 secondi (**Figura 63**), i quali si presentano come nette variazioni dei tre parametri di Stokes, seppur ancora di piccola entità (**Figura 64**).

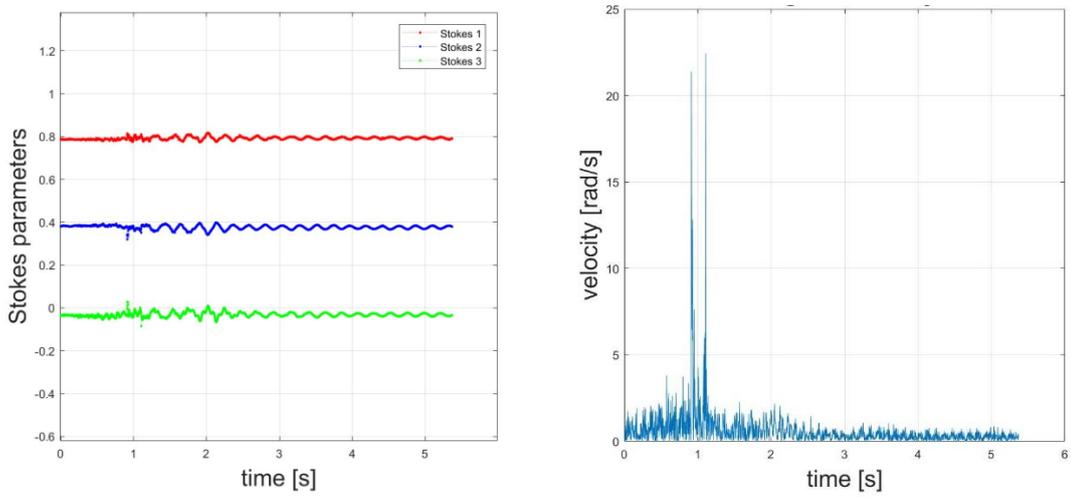


Figura 62: Parametri di Stokes e velocità angolare nella prima simulazione con provino in teflon

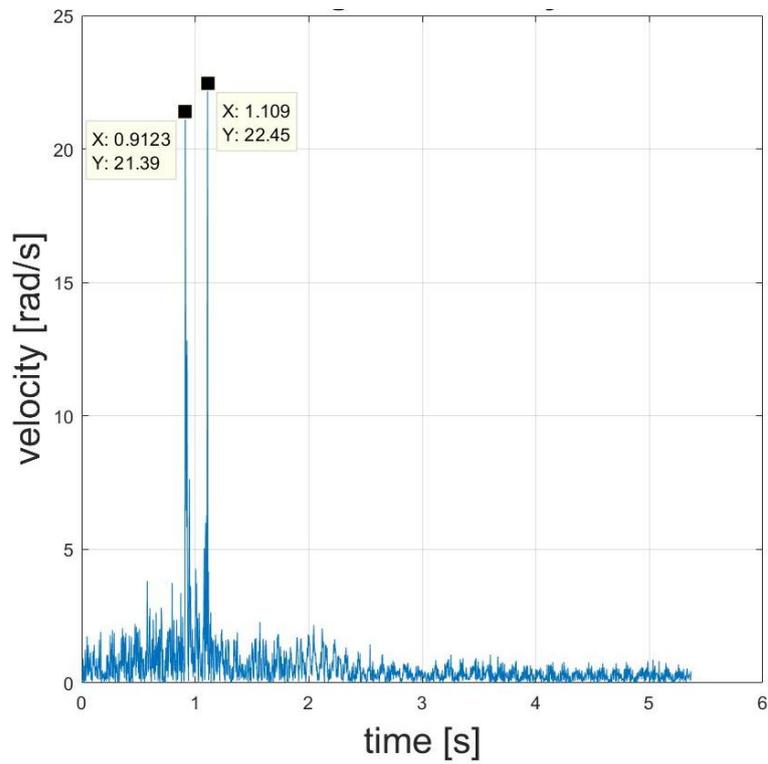


Figura 63: Coordinate dei picchi di velocità angolare nella prima simulazione con provino in teflon

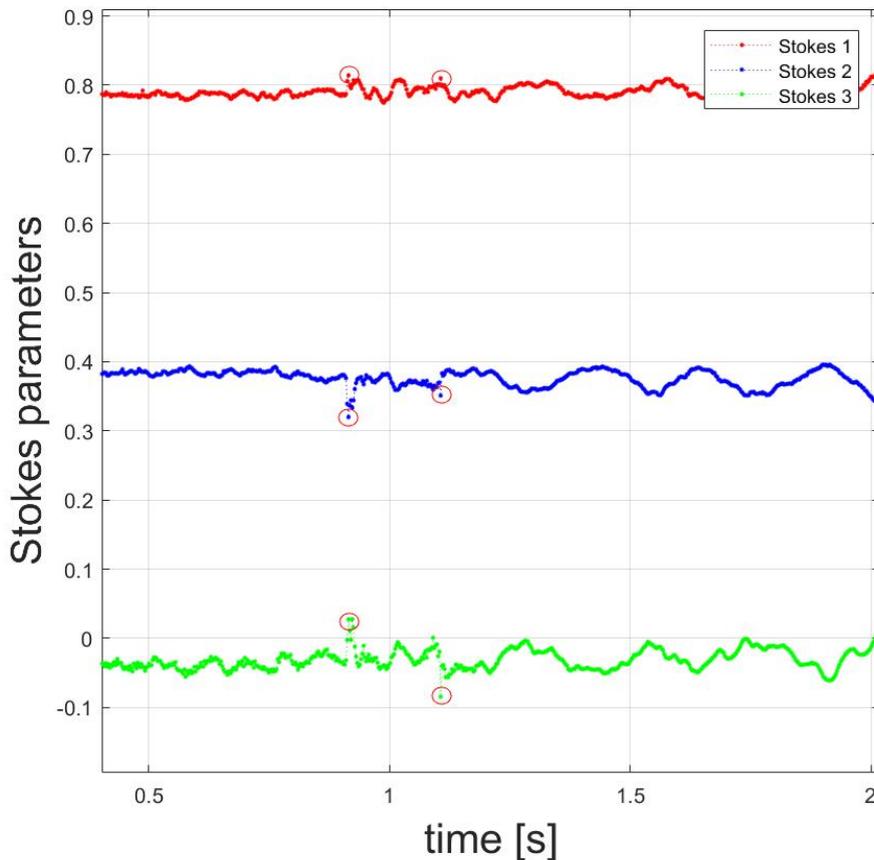


Figura 64: Dettaglio dei parametri di Stokes in corrispondenza dei picchi di velocità angolare (tempi 0.91 s e 1.11 s) nella prima simulazione con provino in teflon

Rimane in ogni caso difficile stabilire una correlazione tra i picchi e quali siano le rispettive sezioni alle quali si riferiscono. Si può però ipotizzare che, vista la loro vicinanza nel tempo, essi siano riferiti alla seconda e all'ultima sezione in cui è disposta la fibra. A supporto di questa ipotesi si può pensare che il primo tratto di fibra non abbia registrato una perturbazione a causa della ancora bassa velocità di rotolamento del provino; mentre nelle due sezioni successive, avendo il provino acquistato velocità durante la discesa, viene registrata una variazione nella polarizzazione.

Anche in questo caso alla fine dell'evento si registrano delle oscillazioni dovute ai tratti di fibra non completamente fissati e, anche in questo caso, l'entità della variazione dei parametri di Stokes è paragonabile con l'ampiezza massima di tali oscillazioni (**Figura 65**) e quindi difficile da rilevare in modo automatico da un algoritmo.

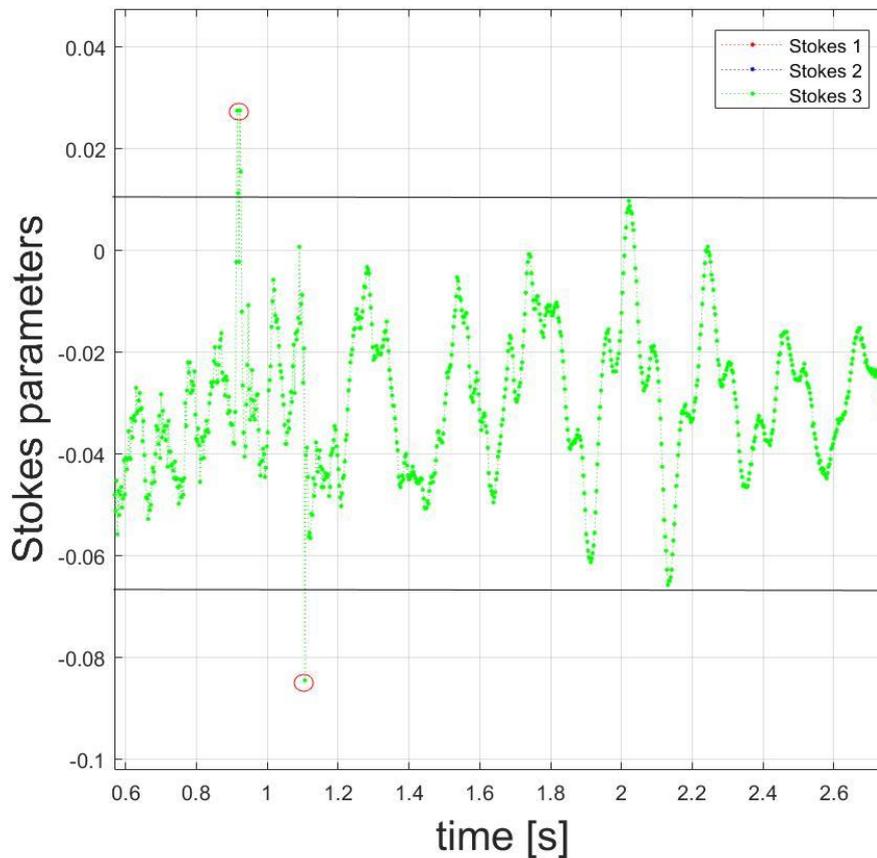


Figura 65: Confronto tra la variazione del parametro di Stokes s_3 dovuta al passaggio del provino e l'ampiezza massima della variazione dovuta alle oscillazioni della fibra non fissata al canale nella prima simulazione con provino in teflon

Per validare queste ipotesi sono stati effettuate altre simulazioni con il medesimo provino.

La seconda simulazione evidenzia ancora due picchi, seppur il primo sia di entità molto minore rispetto al secondo (**Figura 66**). Questo fatto rende ancora una volta di difficile interpretazione i dati registrati. Infine, nella terza ed ultima simulazione, viene registrato soltanto un picco sia nel grafico della velocità angolare sia nell'oscilloscopio (**Figura 67**).

Pertanto anche queste prove non hanno fornito risultati utili alla misura e al riconoscimento del passaggio di un oggetto al di sopra della fibra ottica e il provino usato non è risultato idoneo a questo tipo di sperimentazione.

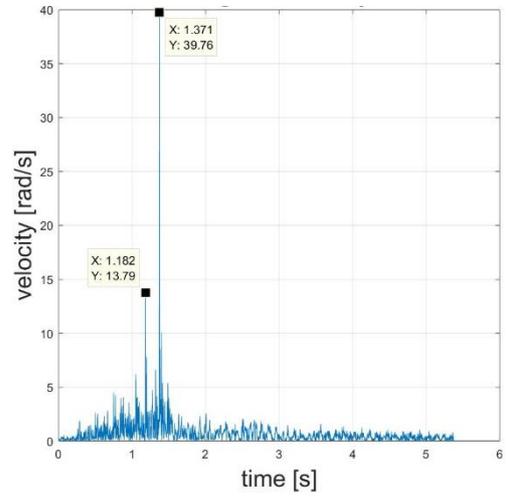
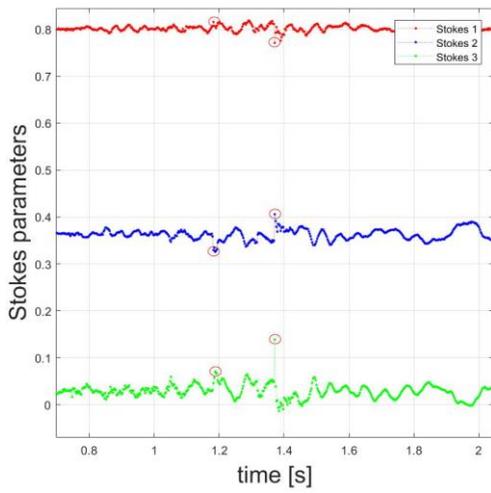


Figura 66: Parametri di Stokes e velocità angolare della seconda simulazione con provino in teflon

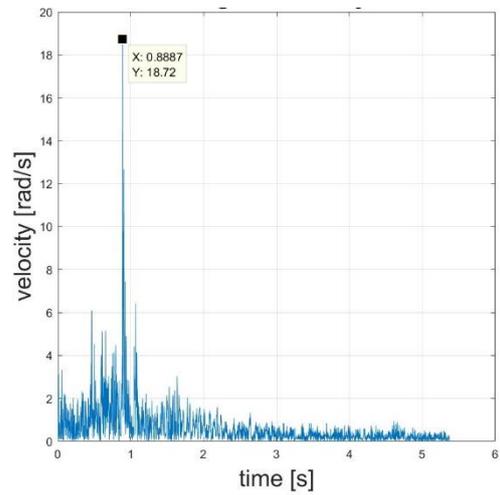
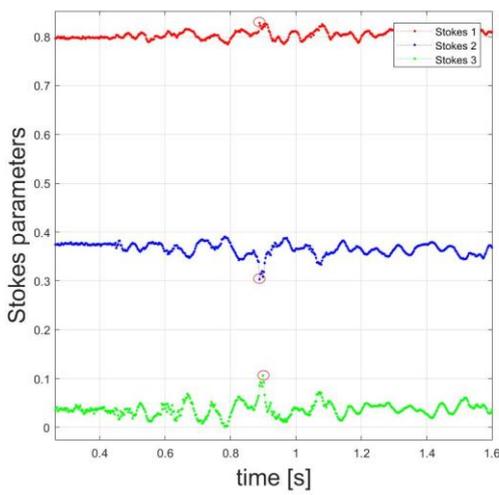


Figura 67: Parametri di Stokes e velocità angolare della terza simulazione con provino in teflon

5.2.3 Provino cilindrico cavo in metallo

Al fine di riuscire a perturbare la polarizzazione della luce all'interno della fibra in modo netto, si è deciso di proseguire la sperimentazione con un provino cilindrico cavo in metallo, le cui caratteristiche sono riportate in **Tabella 7**.

Tabella 7: Caratteristiche del provino cavo in metallo

Massa	
978.8 g	
Altezza	
159.0 mm	
Diametro esterno	
54.9 mm	
Spessore	
5.3 mm	

Dalla prima simulazione fatta con il provino metallico cavo si estrae un grafico della velocità angolare (**Figura 68**) che presenta due picchi di piccola entità nella parte iniziale (0.69 secondi e 0.83 secondi) e due picchi molto più elevati nella seconda parte (1.16 secondi e 1.36 secondi). Questa situazione però non è ben definita nell'oscilloscopio dove i parametri di Stokes non sembrano subire forti variazioni (**Figura 69**). In particolare per quanto riguarda il parametro s_1 , nel quale non si evidenzia nessun cambio repentino. Anche per i parametri s_2 e s_3 è difficile evidenziare i picchi, i quali sono lievemente visibili ai tempi 1.16 s e 1.36 s e praticamente assenti ai tempi 0.69 s e 0.83 s.

Ragionando sui quattro picchi messi in evidenza dal grafico della velocità angolare si può pensare che il primo, il terzo e l'ultimo picco siano relativi al passaggio del provino sopra le sezioni nelle quali è disposta la fibra ottica, mentre il secondo picco può essere attribuito a delle vibrazioni proprie del canale quando il provino attraversa la superficie di separazione tra i due pannelli in legno.

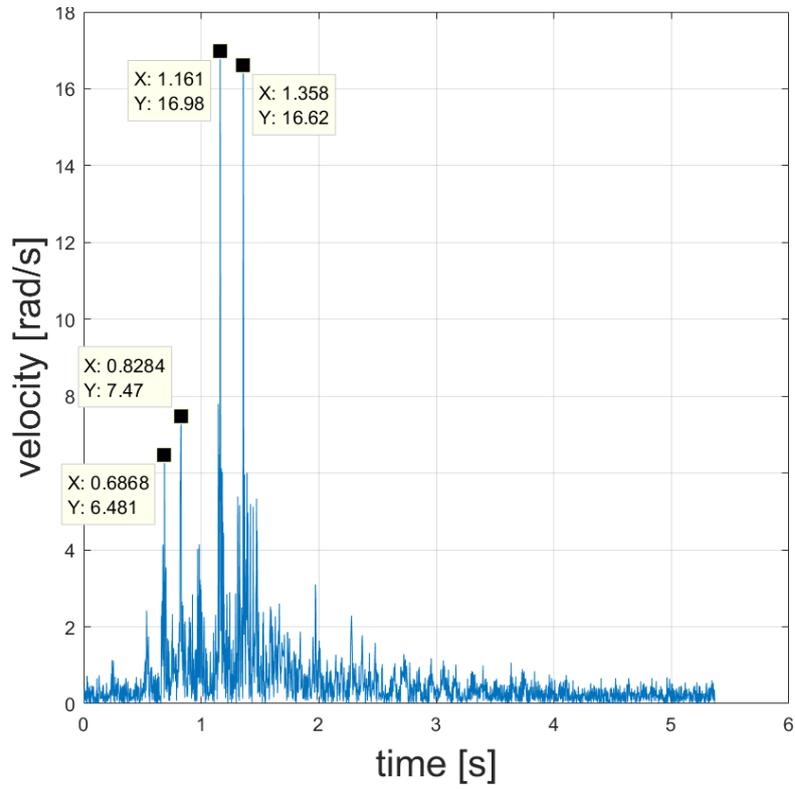


Figura 68: Velocità angolare della prima simulazione con il provino cavo in metallo

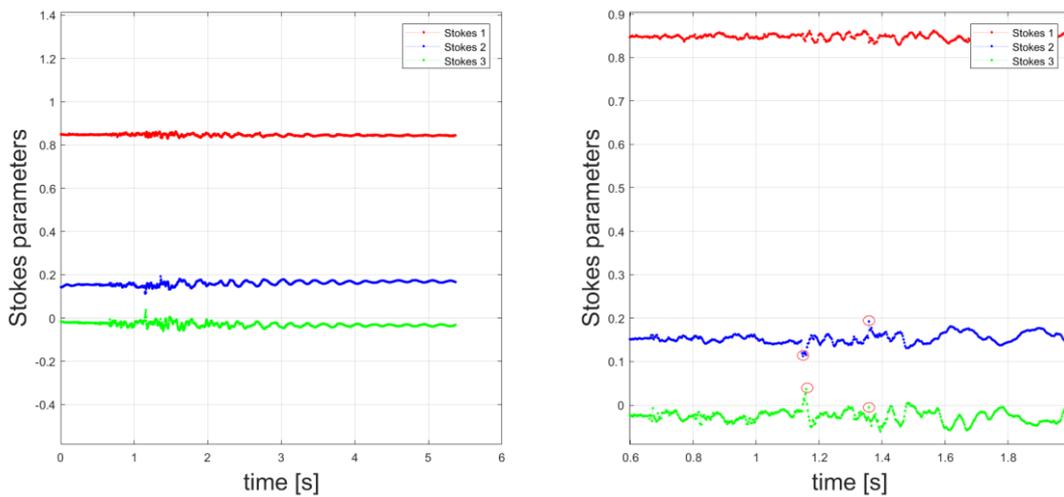


Figura 69: Parametri di Stokes della seconda simulazione con il provino cavo in metallo

La seconda simulazione, effettuata con il medesimo provino cavo in metallo, porta a risultati ancora più soddisfacenti. Infatti nel grafico della velocità angolare si possono osservare tre picchi ben definiti ai tempi di 1.04 s, 1.51 s e 1.70 s (**Figura 70**). Questi tre picchi possono ricondursi alle tre sezioni in cui è disposta la fibra. Ancora una volta, però, queste variazioni non si evidenziano in modo netto nell'oscilloscopio, in particolare per quanto riguarda il parametro s_1 , dove è visibile soltanto il terzo picco. Per il parametri s_2 e s_3 sono ben definiti il secondo e il terzo picco, ma non è visibile la variazione relativa al primo picco (**Figura 71**).

Focalizzandosi sul secondo picco, anche se in un primo momento sembrerebbe essere un dato superfluo e di disturbo all'analisi, in realtà può essere un dato di grande importanza. Infatti, questo dato è stato registrato in un momento in cui il provino non era contatto con la fibra. Questo fa pensare che il sistema di fibre ottiche con analizzatore di polarizzazione potrebbe rilevare il passaggio di un debris flow non solo attraverso il contatto diretto tra flusso e fibra, ma anche attraverso le vibrazioni indotte nel terreno dal suo passaggio.

Infine, il terzo test restituisce di nuovo risultati non soddisfacenti, infatti vengono evidenziati soltanto due picchi nel grafico della velocità angolare e si riesce ad osservare una sola variazione dei parametri di Stokes al tempo di 1.02 s (**Figura 72 e Figura 73**).

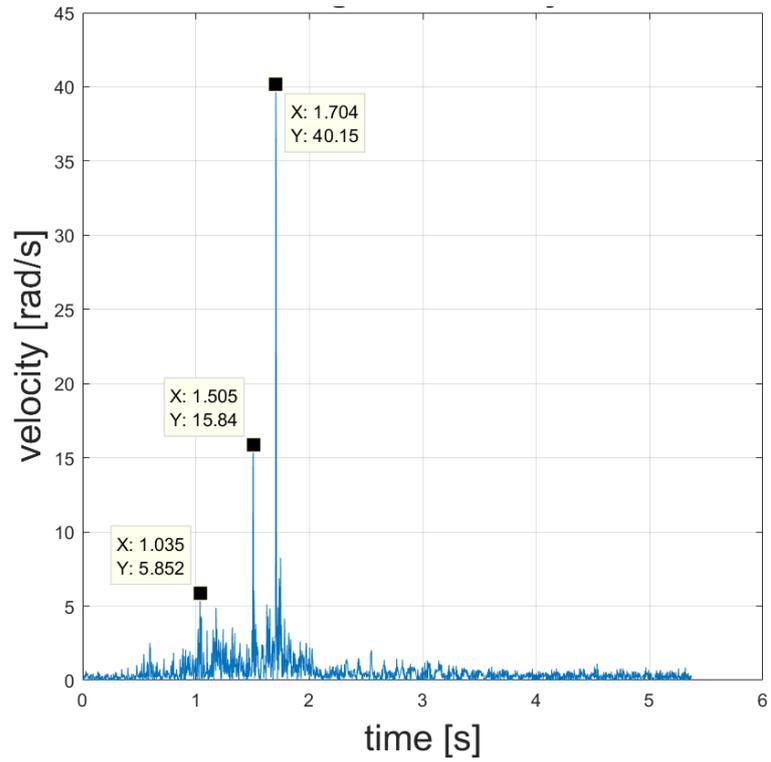


Figura 70: Velocità angolare della seconda simulazione con provino cavo in metallo

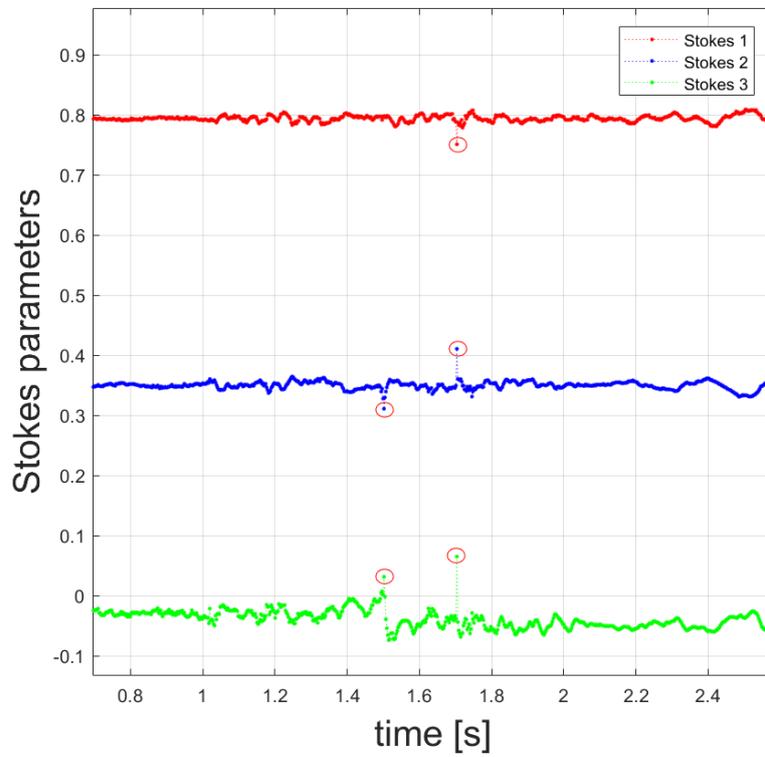


Figura 71: Parametri di Stokes della seconda simulazione con provino cavo in metallo

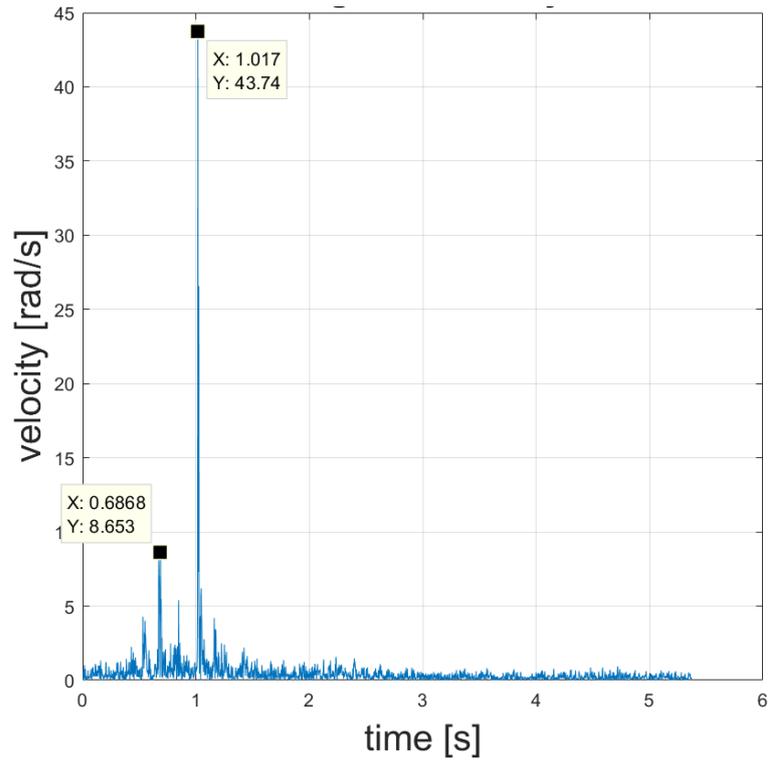


Figura 72: Velocità angolare della terza simulazione con provino cavo in metallo

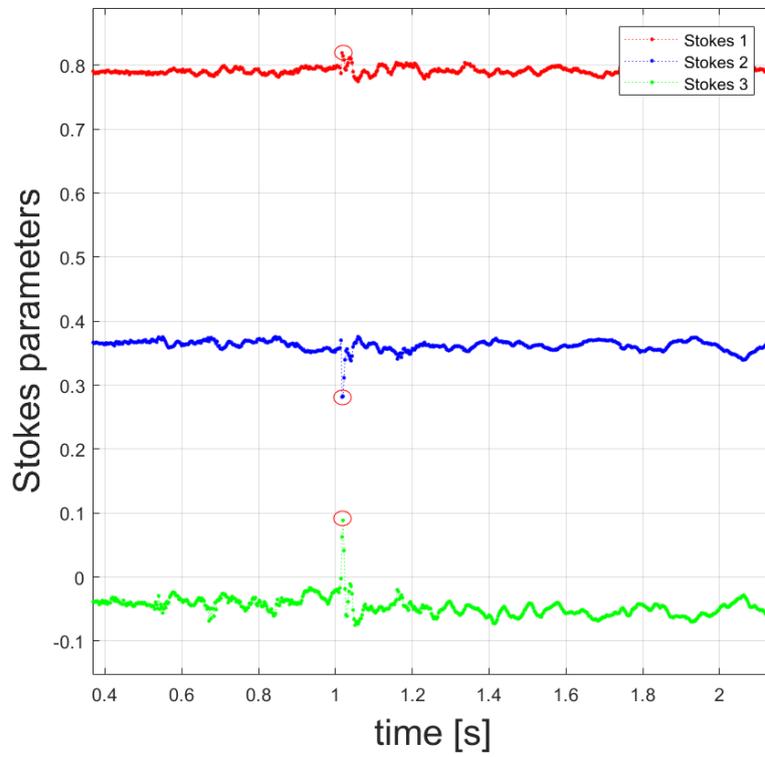


Figura 73: Parametri di Stokes della terza simulazione con provino cavo in metallo

5.2.4 Provino cilindrico in metallo

L'ultimo tentativo è stato effettuato mediante il rotolamento di un provino cilindrico metallico pieno, le cui caratteristiche principali sono riportate in **Tabella 8**.

Tabella 8: Caratteristiche del provino in metallo

Massa	
2153.9 g	
Altezza	
112.4 mm	
Diametro	
56.0 mm	



Dal grafico della velocità angolare si nota un primo picco (al tempo di 0.90 s) che potrebbe sembrare inizialmente insignificante, il quale ha però un valore di velocità angolare simile a quello dei picchi dei test precedenti. Infatti, questo valore, è messo in ombra da un secondo picco che raggiunge una velocità angolare molto elevata (circa 663 rad/s) rispetto alle simulazioni precedenti (**Figura 74**).

Questa situazione si è creata poiché, dopo il passaggio nella prima sezione in cui è disposta la fibra (passaggio ben definito anche nell'oscilloscopio tempo di 0.90 s), il provino ha subito una deviazione della traiettoria a causa della sua superficie irregolare. In tal modo il provino ha urtato con violenza la parte di fibra disposta longitudinalmente all'asse del canale e posta a contatto con le sponde in plexiglass. L'urto ha provocato quindi una grande variazione delle polarizzazione seguita da ampie oscillazioni dovute alle vibrazioni proprie del canale (**Figura 75**).

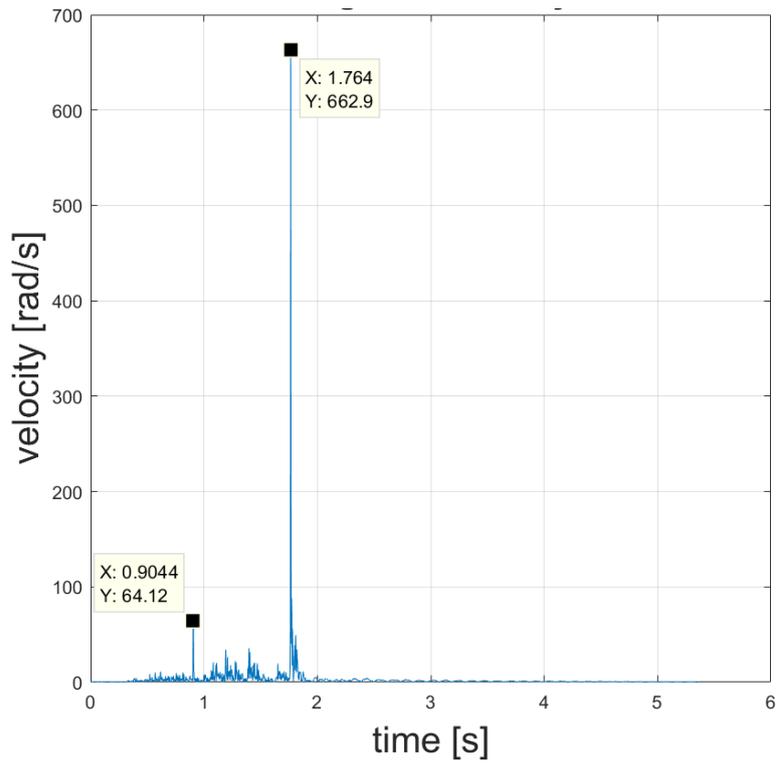


Figura 74: Velocità angolare della simulazione con provino in metallo

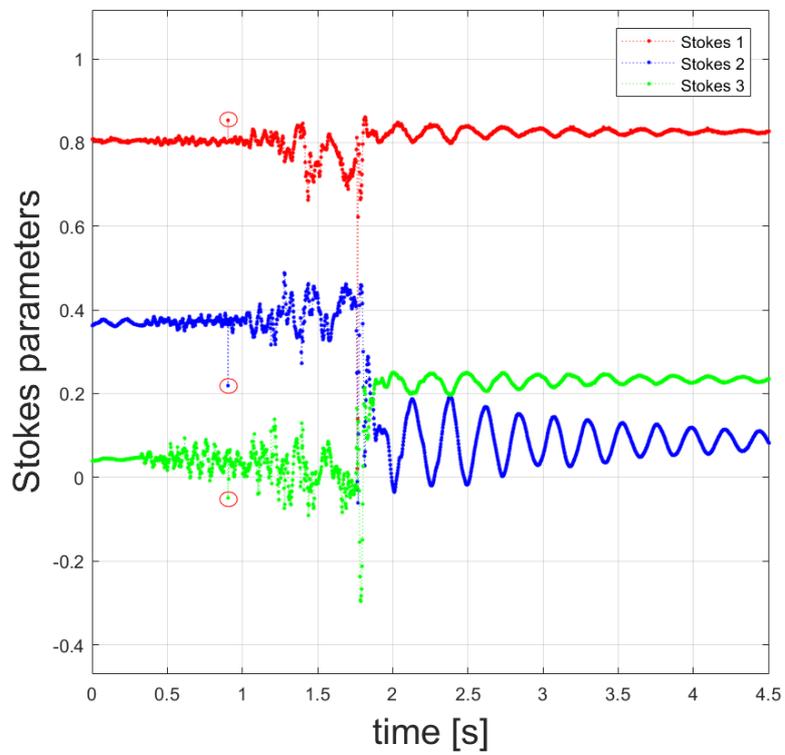


Figura 75: Parametri di Stokes della simulazione con provino in metallo

Un algoritmo implementato nel software MATLAB è stato in grado di rilevare questa netta variazione dei parametri di Stokes (**Figura 76**). Questo algoritmo opera nel grafico dei parametri di Stokes e, quando rileva una variazione significativa, restituisce un segnale di allarme come output. Questo segnale di output è pari a “1” quando un evento pericoloso si verifica, mentre è pari a “-1” in tutti gli altri casi. Il segnale di allarme viene mantenuto finché i parametri di Stokes non si stabilizzano in un nuovo stato di quiete, che può essere diverso da quello iniziale [25].

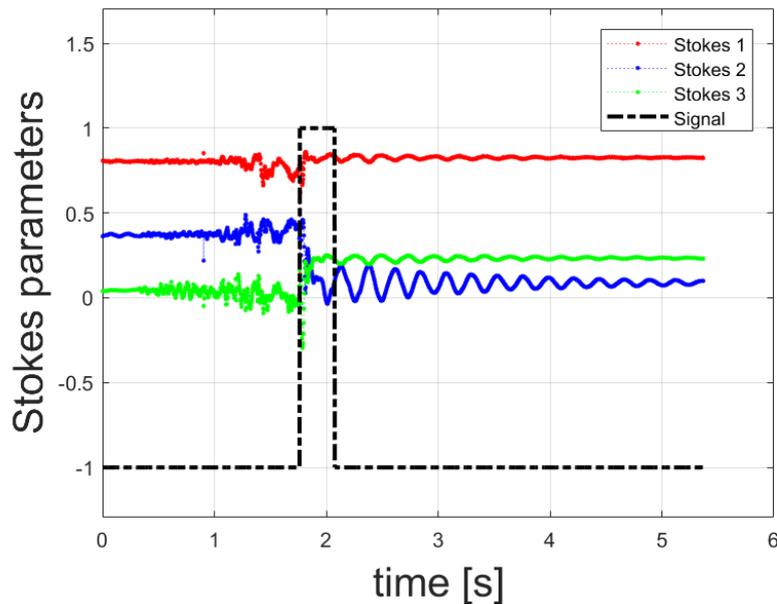


Figura 76: Segnale di allarme nella simulazione con provino in metallo

5.3 SINTESI DEI RISULTATI

Dalle prove effettuate non sono sempre emersi risultati significativi che possano essere usati per monitorare il passaggio del provino al di sopra delle sezioni in cui è disposta la fibra ottica. Infatti, seppur in alcuni casi si siano ottenuti esiti soddisfacenti, è difficile trovare una ripetitività dei risultati. Questo fatto è determinato in primo luogo dai campioni utilizzati, i quali non riescono a provocare perturbazioni sufficientemente nette al loro passaggio. Di conseguenza, i dati registrati sono molto confusi, ed è difficile estrarre elementi significativi che indichino il passaggio del provino in una determinata

sezione dal momento che l'intero segnale è disturbato da un rumore di fondo dovuto alle vibrazioni proprie del canale e alle oscillazioni delle parti di fibra non fissate.

In ogni caso i dati ottenuti lasciano pensare che sia possibile ottenere risultati più rilevanti variando la configurazione delle simulazioni. Infatti, si evidenzia come i provini più piccoli e leggeri (provini in gomma e teflon), a differenza di quelli più grandi e pesanti (provini in metallo), non riescano a causare delle variazioni di polarizzazione della luce che viaggia all'interno della fibra.

Una prima soluzione al problema potrebbe essere quella di individuare nuovi provini da testare, i quali abbiano un peso maggiore, ma soprattutto anche un'altezza maggiore. Difatti, aumentando l'altezza del provino, questo andrebbe a perturbare una parte maggiore di fibra durante il rotolamento. La seconda alternativa potrebbe essere quella di andare a diminuire la pendenza del canale. La diminuzione di pendenza porterebbe a diminuire la velocità di rotolamento dei provini e di conseguenza anche le vibrazioni del canale provocate dal loro moto.

5.4 CONFRONTO DELLE REGISTRAZIONI CON ANALISI VIDEO

Al fine di validare i dati acquisiti dalla fibra ottica è possibile valutare se l'intervallo temporale tra due picchi consecutivi sia lo stesso in ogni test effettuato con provini dello stesso materiale e successivamente eseguire un confronto con i tempi estrapolati da un filmato della simulazione.

Per questa analisi vengono quindi presi in considerazione i primi due test effettuati con il provino cavo in metallo, per il quale sembra esserci una ripetitività nei dati acquisiti.

Facendo riferimento al primo test si notano quattro picchi nel grafico della velocità angolare (**Figura 68**) ai tempi 0.69 s, 0.83 s, 1.16 s e 1.36 s indicati in **Tabella 9** rispettivamente con i termini P₁, P₂, P₃ e P₄. Calcolando le differenze in termini di tempo tra due picchi successivi si ottengono i valori indicati in **Tabella 10**.

Tabella 9: Tempi corrispondenti ai picchi di velocità angolare nella prima simulazione con provino cavo in metallo

	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄
Tempo [s]	0.69	0.83	1.16	1.36

Tabella 10: Differenze in termini di tempo tra due picchi successivi della velocità angolare della prima simulazione con provino cavo in metallo

	P₂ - P₁	P₃ - P₂	P₄ - P₃
Differenza di tempo [s]	0.14	0.33	0.20
	0.47 (P ₃ - P ₁)		

Per il secondo test con provino cavo in metallo, il quale presentava solo tre picchi significativi nel grafico della velocità angolare (**Figura 70**), è stato eseguito lo stesso procedimento e i risultati ottenuti sono evidenziati in **Tabella 11** e **Tabella 12**.

Tabella 11: Tempi corrispondenti ai picchi di velocità angolare nella seconda simulazione con provino cavo in metallo

	P₁	P₂	P₃
Tempo [s]	1.04	1.51	1.70

Tabella 12: Differenze in termini di tempo tra due picchi successivi della velocità angolare della seconda simulazione con provino cavo in metallo

	P₂ - P₁	P₃ - P₂
Differenza di tempo [s]	0.47	0.20

Confrontando i risultati ottenuti dai due test si nota immediatamente come, in entrambi, la differenza temporale tra gli ultimi due picchi sia la stessa e pari a 0.20 s. Analizzando invece le differenze temporali tra gli altri picchi si osserva come nel secondo caso il tempo che intercorre tra il primo e il secondo segnale è pari a 0.47 s. Tale valore è lo stesso del tempo che intercorre tra il primo e il terzo segnale nel primo test. Questo fatto supporta l'ipotesi fatta nel Capitolo 5.2.3, nella quale si sosteneva che il secondo picco fosse

riferito al passaggio del provino al di sopra della superficie di separazione dei due pannelli in legno che costituiscono il fondo del canale.

L'analisi appena fatta porta quindi a considerare che il tempo intercorso tra la Sezione 1 e la Sezione 2 sia pari a 0.47 s e quello tra la Sezione 2 e la Sezione 3 sia pari a 0.2 s.

Con lo scopo di convalidare questa analisi, è stato esaminato un filmato nel quale viene ripreso il moto di rotolamento del provino cavo in metallo. Da questo filmato si vogliono estrarre i tempi corrispondenti al passaggio del provino nelle tre sezioni dove è disposta la fibra e confrontarli con i tempi derivanti dall'analisi precedente.

L'analisi del video è stata fatta con l'aiuto del software Adobe Premiere Pro CC, il quale ha permesso di esaminare ogni singolo fotogramma della ripresa.

Il primo step, dopo aver importato il video nel software, è stato quello di individuare i fotogrammi nei quali è visibile il passaggio del provino al di sopra della fibra ottica. Una volta individuati tutti i fotogrammi necessari, compreso quello iniziale corrispondente al momento del rilascio del provino, è stato possibile mettere in sovrapposizione ad ogni fotogramma il corrispondente minutaggio. Il comando "*codice di tempo*" permette di mettere in sovrapposizione al video sia un timecode in formato SMPTE, sia il numero del fotogramma visualizzato (**Figura 77**). Il formato SMPTE è un'identificazione oraria in formato ore:minuti:secondi:fotogrammi.

Il numero identificativo di ogni fotogramma è riportato in **Tabella 13**, dove le sezioni di interesse sono indicate con i termini S_1 , S_2 , S_3 e la sezione di rilascio del provino è indicata con S_0 . Di seguito viene conteggiato il numero di fotogrammi registrati tra il passaggio del provino in una sezione e quella successiva e le differenze progressive sono riportate in **Tabella 14**. Infine, ricordando che il video è stato registrato a 30 fps, dalla differenza del numero di fotogrammi è possibile ricavare il tempo necessario al provino a rotolare tra due sezioni successive semplicemente dividendo il numero di fotogrammi per il numero di fps dell'acquisizione, ovvero 30 (**Tabella 15**).

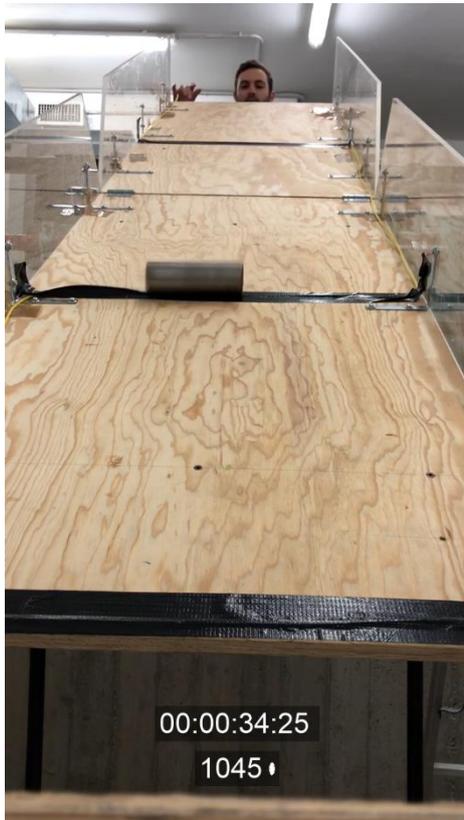


Figura 77: Fotogrammi rappresentativi della simulazione con timecode e numero del fotogramma in sovrapposizione (provino cavo in metallo)

Tabella 13: Numero identificativo dei fotogrammi (provino cavo in metallo)

	S₀	S₁	S₂	S₃
n° Fotogramma	1010	1030	1045	1051

Tabella 14: Numero di fotogrammi che intercorrono tra due fotogrammi successivi (provino cavo in metallo)

	S₁ - S₀	S₂ - S₁	S₃ - S₂
Differenza tra il n° di fotogrammi	20	15	6

Tabella 15: Tempi che intercorrono tra il passaggio del provino in due sezioni successive derivanti dall'analisi video (provino cavo in metallo)

	S₁ - S₀	S₂ - S₁	S₃ - S₂
Differenza tra il n° di fotogrammi	20	15	6
Tempo [s]	0.67	0.50	0.20

I dati ottenuti dall'analisi video sono concordi a quelli registrati dalla fibra ottica. Tra la Sezione 1 e la Sezione 2 la fibra registra un tempo di 0.47 s, mentre l'analisi video restituisce un tempo di 0.50 s (i risultati differiscono di un valore equivalente ad 1 frame, ovvero 0.03 s). Per quanto riguarda invece l'intervallo temporale tra la Sezione 2 e la Sezione 3, le due analisi forniscono lo stesso valore pari a 0.20 s. In aggiunta dall'analisi video è possibile calcolare il tempo totale di discesa pari a 1.37 s, per differenza tra il numero del fotogramma corrispondente alla Sezione 3 e quello corrispondente alla Sezione 0.

Lo stesso processo di analisi è stato utilizzato per il provino in teflon; tutti i risultati vengono mostrati di seguito in **Figura 78**, **Tabella 16**, **Tabella 17** e **Tabella 18**.



Figura 78: Fotogrammi rappresentativi della simulazione con timecode e numero del fotogramma in sovrapposizione (provino in teflon)

Tabella 16: Numero identificativo dei fotogrammi (provino in teflon)

	S₀	S₁	S₂	S₃
n° Fotogramma	1261	1281	1294	1300

Tabella 17: Numero di fotogrammi che intercorrono tra due fotogrammi successivi (provino in teflon)

	S₁ - S₀	S₂ - S₁	S₃ - S₂
Differenza tra il n° di fotogrammi	20	13	6

Tabella 18: Tempi che intercorrono tra il passaggio del provino in due sezioni successive derivanti dall'analisi video (provino in teflon)

	S₁ - S₀	S₂ - S₁	S₃ - S₂
Differenza tra il n° di fotogrammi	20	13	6
Tempo [s]	0.67	0.43	0.20

Dai dati sopra riportati si evince quindi che i picchi di velocità angolare (**Figura 63** e **Figura 66**) registrati nelle prove con il provino in teflon si riferiscono alla Sezione 2 e alla Sezione 3, poiché questi differiscono di un tempo pari a 0.20 s, stesso tempo registrato dall'analisi video. In aggiunta dall'analisi video è possibile calcolare il tempo totale di discesa pari a 1.30 s, per differenza tra il numero del fotogramma corrispondente alla Sezione 3 e quello corrispondente alla Sezione 0.

5.5 NUOVA CONFIGURAZIONE DELLE SIMULAZIONI

Al fine di produrre nuovi grafici ed estrapolare nuovi dati per la valutazione delle potenzialità del sistema esaminato, si sono effettuati nuovi test variando la disposizione della fibra ottica. La Sezione 1 viene rimossa e traslata verso il basso in modo da farla corrispondere con la sezione di separazione tra i due pannelli in legno (distanza di 1.5 m da entrambi gli estremi del canale). Tale decisione è stata presa poiché in quasi tutte le registrazioni, il passaggio del provino non veniva registrato nella Sezione 1, ma soltanto nelle Sezioni 2 e 3. In tal modo, il provino, percorrendo uno spazio maggiore prima di attraversare la prima sezione, acquista velocità e urta la fibra con maggiore energia.

Purtroppo anche queste prove non hanno fornito dati in più rispetto alle simulazioni precedenti. Infatti, ancora in tutti i casi, è difficile trovare una ripetitività nei nelle registrazioni e individuare il passaggio dei provini in tutte e tre le sezioni. Questo ancora una volta a causa di picchi non ben definiti che si confondono nel rumore di fondo del segnale.

Un unico miglioramento si nota nelle simulazioni con il provino in gomma. Difatti, grazie alla sua leggerezza, provoca poche vibrazioni del canale durante il rotolamento e il rumore di fondo è così ridotto al minimo mettendo bene in evidenza le variazioni sia dei parametri di Stokes sia della velocità angolare. La situazione appena descritta è ben evidenziata in **Figura 79** e **Figura 80**. Come si vede dalle due figure però è presente soltanto un picco, a differenza dei tre che ci si attende. Tale circostanza è dovuta al fatto che, quando il provino incontra la fibra disposta nella mezzeria dello scivolo, questo tende a saltare e a distaccarsi dal fondo, sorvolando così le due sezioni di fibra che si trovano più a valle.

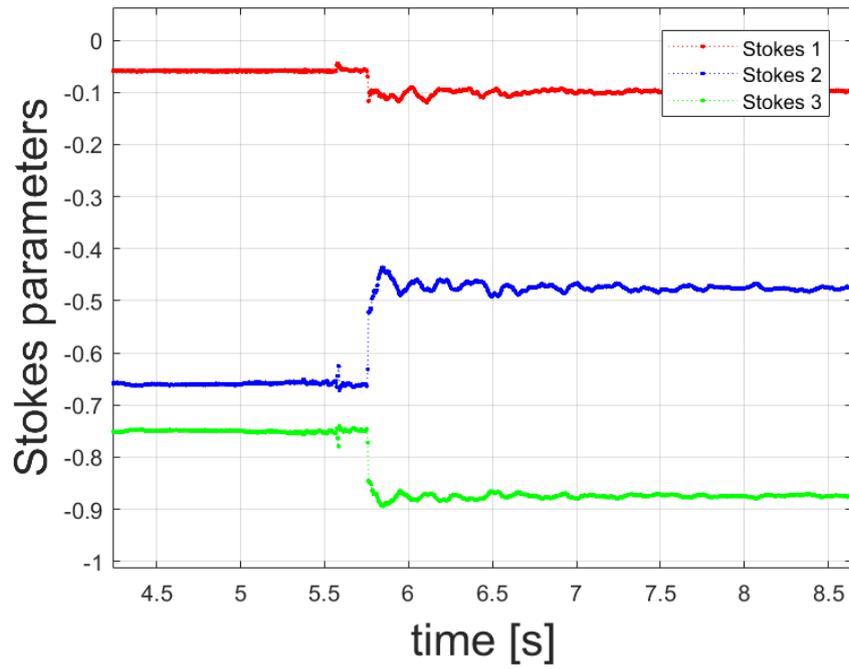


Figura 79: Parametri di Stokes della simulazione con provino in gomma (nuova configurazione)

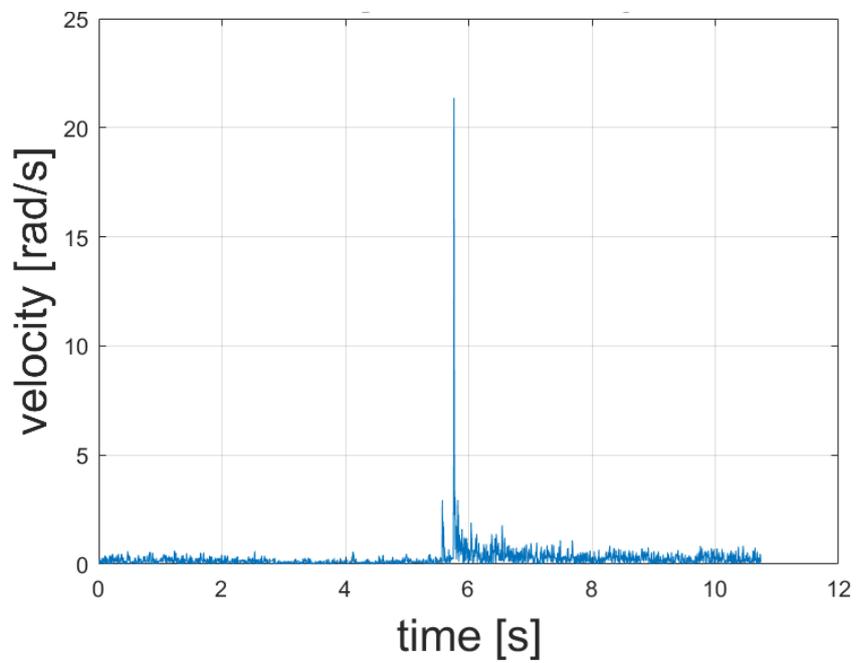


Figura 80: Velocità angolare nella simulazione con provino in gomma (nuova configurazione)

6 ANALISI E MODELLAZIONE NUMERICA DEGLI ESPERIMENTI

Un aspetto estremamente rilevante, ma anche di difficile valutazione, è la previsione dell'evoluzione di un fenomeno come il debris flow. In molti casi, quando non è possibile impedirne l'insorgere o controllarne il movimento attraverso opere di difesa, è importante conoscere l'area potenzialmente a rischio, la distanza di propagazione e la velocità di arrivo della massa coinvolta. Questa previsione è possibile attraverso modelli numerici, che prevedono il ricorso ad una semplificazione della realtà modellando forma e dimensione di ogni elemento coinvolto e definendo le caratteristiche dei vari materiali. Inoltre, dal confronto tra analisi numerica ed evidenze passate, è possibile tarare e ricavare i parametri di cui non si è a conoscenza.

Nel caso specifico del presente studio l'analisi numerica è utile per ricavare la resistenza al rotolamento che si sviluppa durante il moto dei provini all'interno del canale. Ricostruendo all'interno di un apposito software la geometria del problema è possibile ricavare il valore di attrito tra provino cilindrico e superficie in legno del canale. Tutto questo è possibile grazie alle analisi video e ai dati registrati dalla fibra ottica che hanno permesso di calcolare i tempi di rotolamento, rendendo così il valore di attrito l'unico parametro incognito del problema.

Il problema in questione viene risolto con l'aiuto del software PFC^{2D}, software per l'analisi numerica attraverso il Metodo agli Elementi Discreti (DEM) con schematizzazione particellare degli elementi del domino.

6.1 CODICE DI CALCOLO NEL SOFTWARE PFC^{2D}

Il software PFC^{2D} ha permesso di schematizzare il problema reale attraverso due semplici elementi di base del programma: l'elemento *ball* e l'elemento *wall*. Infatti, essendo un software che permette la discretizzazione particellare, i provini cilindrici possono essere schematizzati come particelle circolari nella versione bi-dimensionale.

Il primo step, dopo aver definito il dominio del problema, è quello di schematizzare il profilo del canale mediante l'utilizzo di un elemento *wall*. Attraverso l'utilizzo dei

comandi “*wall generate plane*” e “*wall rotate angle*” è prima possibile creare una superficie piana e poi ruotarla di un angolo a piacimento.

A questo punto è possibile schematizzare il provino come una particella circolare attraverso il comando “*ball create*”. Tale comando permette di specificare il raggio e la posizione iniziale in cui collocare la particella appena creata. Successivamente con l’utilizzo dei comandi “*ball attribute density*” e “*ball attribute velocity*” è possibile assegnare alla particella creata rispettivamente la densità del provino e la velocità iniziale al quale esso è soggetto.

Di seguito, viene richiamato il comando “*contact property fric*” il quale esprime il valore di attrito tra l’elemento *ball* e l’elemento *wall*. Questo valore viene inizialmente ipotizzato e successivamente variato in modo iterativo finché i risultati dell’analisi numerica non coincidono con quelli delle simulazioni reali.

Infine, prima di procedere al calcolo e alla visualizzazione dei risultati, è necessario impostare il valore di gravità tramite il comando “*set gravity*” ed utilizzare il comando “*history*” per permettere il plottaggio dei valori di spostamento e velocità in funzione del tempo.

In **Figura 81** è raffigurato il modello schematizzato del problema reale.

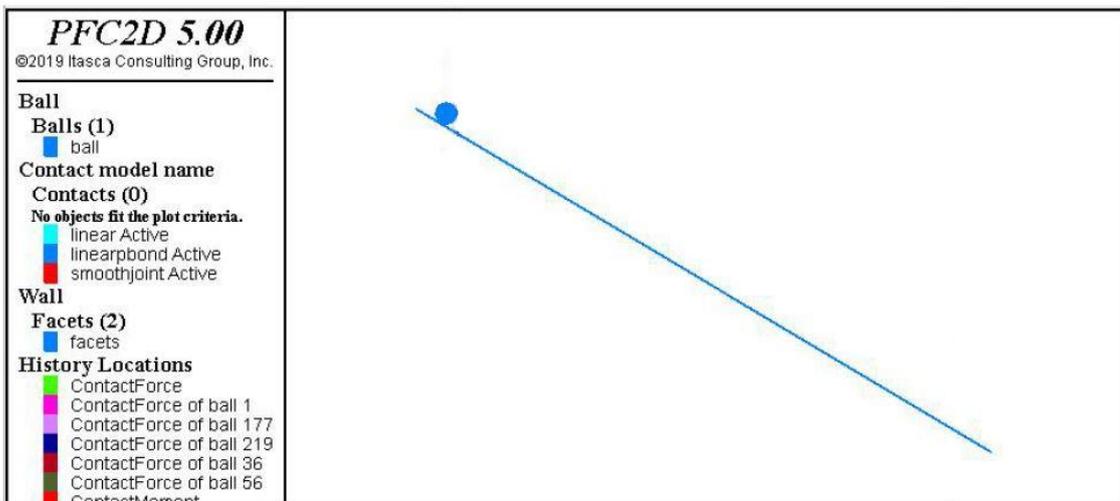


Figura 81: Modello del problema in PFC^{2D} [37]

6.2 RISULTATI DELL'ANALISI NUMERICA

L'analisi numerica viene svolta soltanto per i provini dei quali si dispone di dati rilevanti, derivanti dalle analisi video e dalle registrazioni della fibra ottica. Pertanto, gli unici due provini per i quali è stata svolta la modellazione sono il provino in teflon ed il provino cavo in metallo.

Utilizzando i comandi descritti nel Capitolo 6.1, è possibile impostare la pendenza dell'elemento *wall* pari a 30° , ovvero la pendenza del modello fisico costruito in laboratorio ed assegnare all'elemento *ball* le caratteristiche del provino riportate nel Capitolo 5.2.

L'ultimo valore che rimane da inserire è quello relativo all'attrito tra i due elementi, il quale però risulta essere un parametro incognito del problema. Per questo motivo, tale valore, viene ipotizzato a priori pari a 0.8 e successivamente variato in modo iterativo fintanto che i risultati dell'analisi numerica non coincidono con quelli dell'analisi video e quelli derivanti dalle registrazioni con fibra ottica.

Il procedimento seguito per ogni provino viene illustrato nei seguenti Capitoli.

6.2.1 Provino cilindrico in teflon

Compilando il codice nel software PFC2D, con i parametri corrispondenti al provino in teflon e il valore iniziale di attrito pari a 0.8, si ottiene il grafico degli spostamenti in funzione del tempo illustrato in **Figura 82**.

Ricordando dall'analisi video, il tempo impiegato dal provino a percorrere l'intera lunghezza del canale (3 metri) è pari a 1.30 secondi. Quindi, entrando nel grafico con una distanza pari a 3 m, si valuta quale è il tempo corrispondente computato dall'analisi numerica. Si nota immediatamente come il tempo (circa 1.45 s) sia superiore a quello registrato dall'analisi video; questo fatto implica aver ipotizzato in modo errato il valore di attrito. Il valore di 0.8 risulta pertanto troppo elevato ed è necessario diminuirlo andando ad effettuare una nuova analisi.

Il secondo tentativo viene effettuato con un valore di attrito pari a 0.4 e il grafico degli spostamenti è riportato in **Figura 83**. Anche in questo caso, il tempo calcolato dall'analisi (circa 1.40 s), necessario a percorrere i 3 metri di lunghezza del canale, risulta eccessivo e l'attrito deve essere diminuito di nuovo.

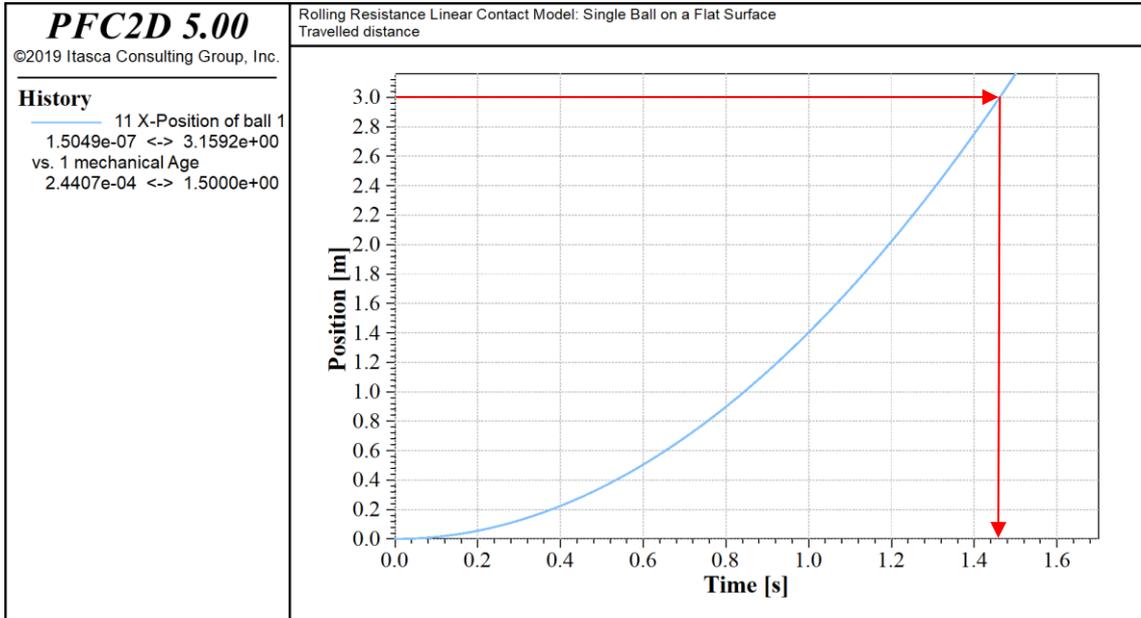


Figura 82: Spostamenti del provino in teflon con attrito pari 0.8

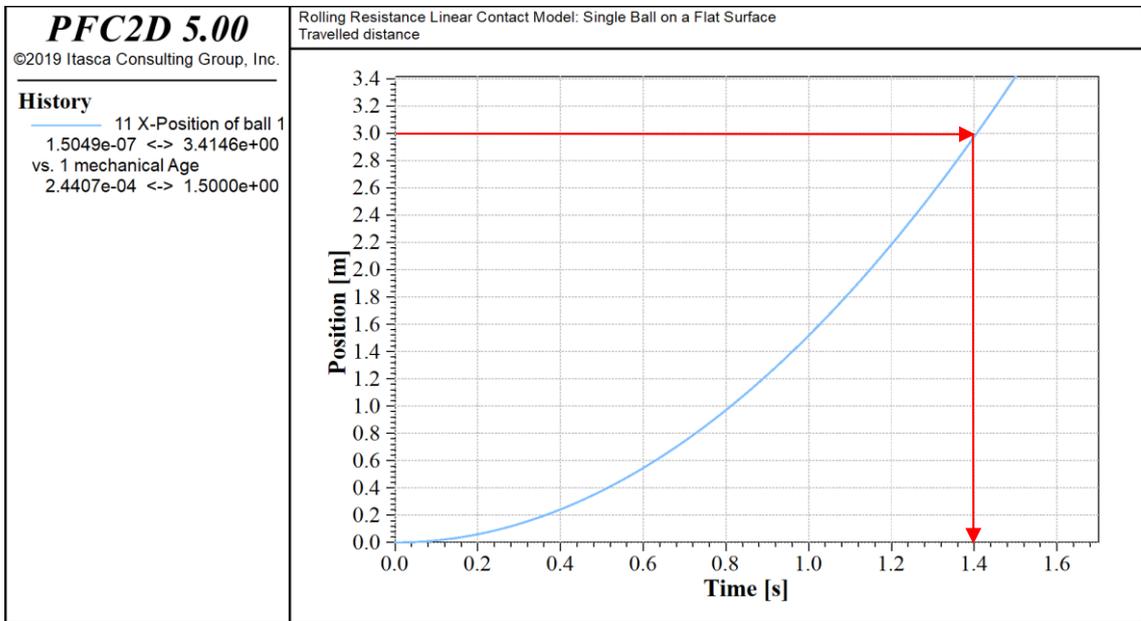


Figura 83: Spostamenti del provino in teflon con attrito pari 0.4

Anche la terza analisi (**Figura 84**), effettuata con un valore di attrito pari a 0.2, restituisce un intervallo temporale eccessivo (1.33 s) e non paragonabile a quello ottenuto dall'analisi video.

Infine, diminuendo ancora il valore di attrito a 0.1, l'analisi finalmente fornisce un valore pari 1.30 s per uno spostamento di 3 m (**Figura 85**). Per confermare che questo sia il valore di attrito reale che governa il problema e che il grafico degli spostamenti sia realmente rappresentativo della simulazione fisica, si confrontano con tale curva anche gli altri dati a disposizione. Infatti, entrando nel grafico con le distanze della Sezione 1 (0.84 m) e della Sezione 2 (2.20 m) dalla parte sommitale del canale, si ricavano i tempi corrispondenti. Anche questi tempi, approssimativamente 0.67 s e 1.10 s per le Sezioni 1 e 2, coincidono con quelli estrapolati dalla analisi video e dall'analisi dei dati registrati dalla fibra ottica.

Il processo iterativo viene stoppato e il valore di attrito risulta quindi essere pari a 0.1. A questo punto è possibile plottare l'andamento della velocità, il quale permette di conoscere la velocità del provino in ogni punto del canale. Conoscendo quindi gli andamenti degli spostamenti e della velocità è possibile usare questi grafici per predizioni sul comportamento di simulazioni fisiche future.

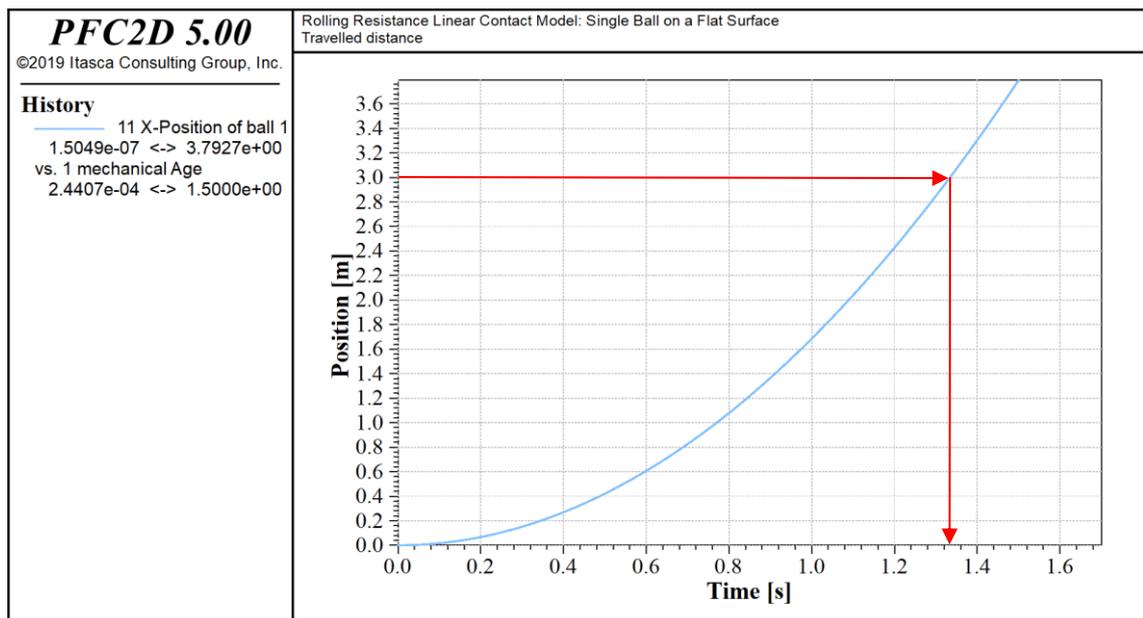


Figura 84: Spostamenti del provino in teflon con attrito pari 0.2

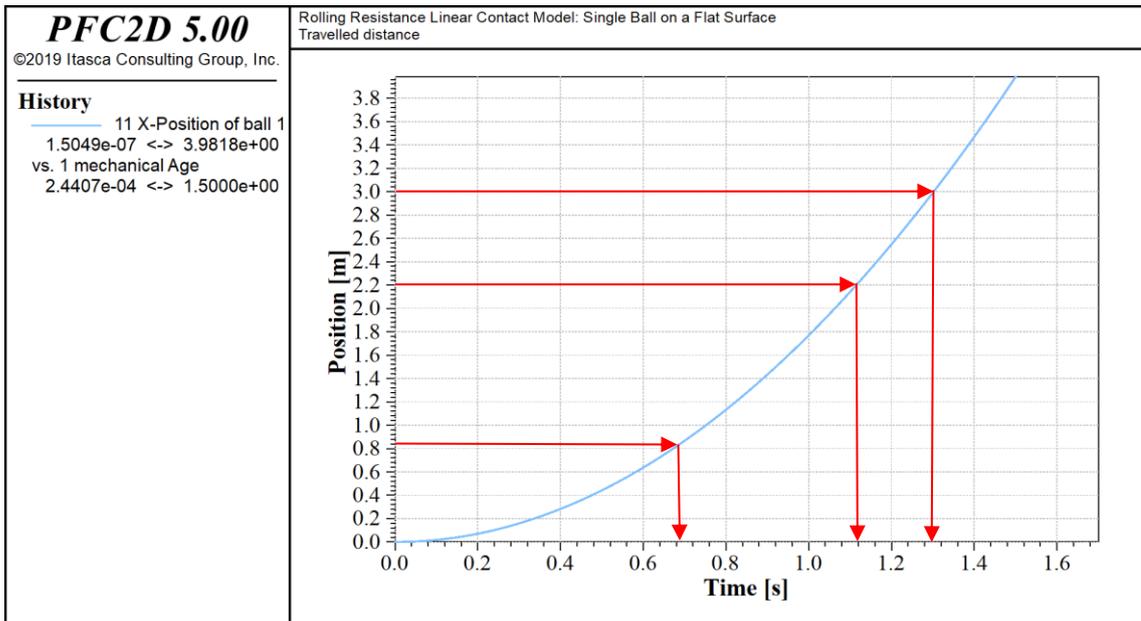


Figura 85: Spostamenti del provino in teflon con attrito pari 0.1

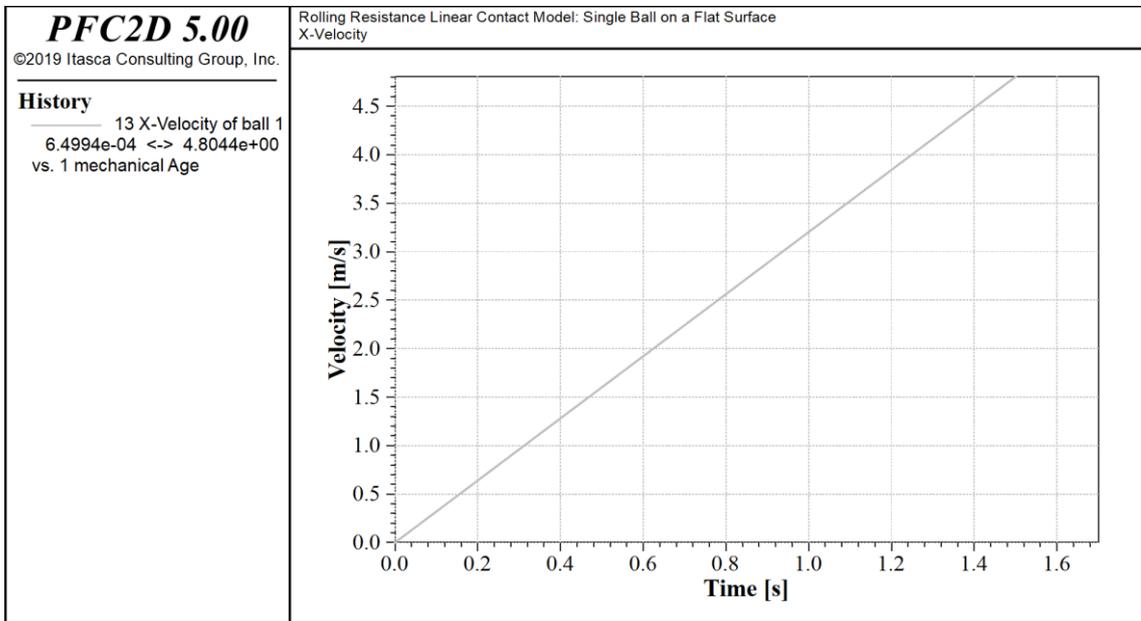


Figura 86: Velocità del provino in teflon con attrito pari 0.1

6.2.2 Provino cilindrico cavo in metallo

Per il provino cilindrico cavo in metallo è seguita la stessa procedura utilizzata precedentemente per il provino in teflon, ricordando però che il tempo totale di discesa registrato dall'analisi video è pari a 1.37 s.

Partendo di nuovo da un valore di attrito pari a 0.8, si eseguono le analisi compilando il codice con le proprietà relative al provino cavo in metallo. Il primo tentativo produce, anche in questo caso un risultato scorretto (**Figura 87**). Il valore di attrito viene poi diminuito a 0.4 (**Figura 88**) e successivamente a 0.2; per quest'ultimo si trova una corrispondenza con tutti i valori registrati dall'analisi video e quelli derivanti dai dati registrati dalla fibra ottica (**Figura 89**). È quindi possibile estrarre il grafico dell'andamento della velocità del provino cavo in metallo con valore di attrito pari a 0.2; tale grafico viene riportato in **Figura 90**.

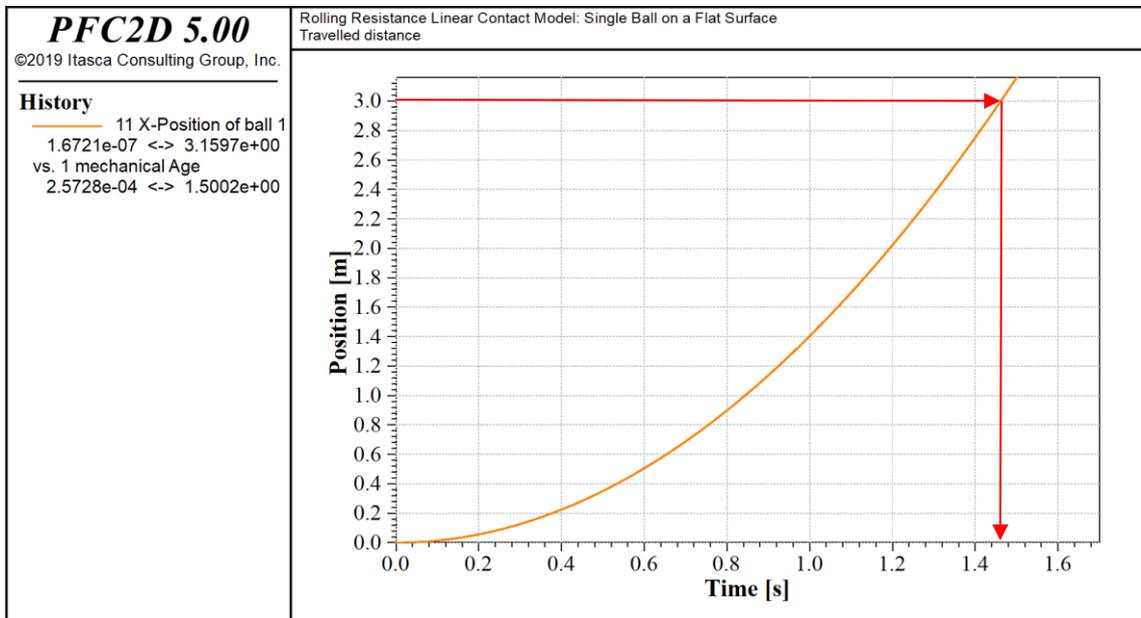


Figura 87: Spostamenti del provino cavo in metallo con attrito pari 0.8

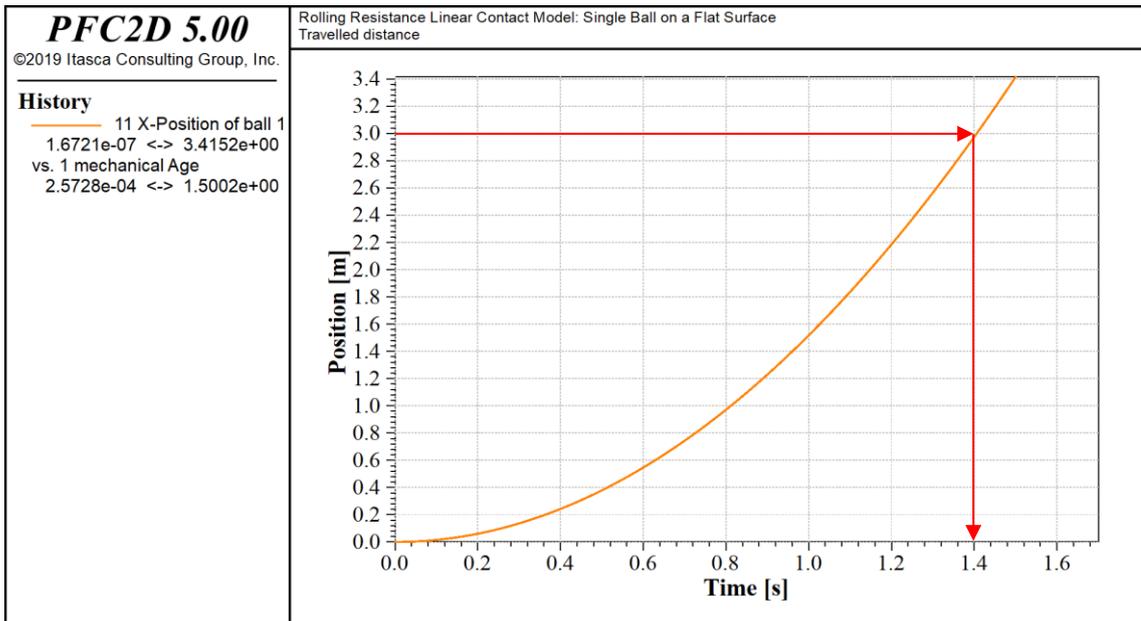


Figura 88: Spostamenti del provino cavo in metallo con attrito pari 0.4

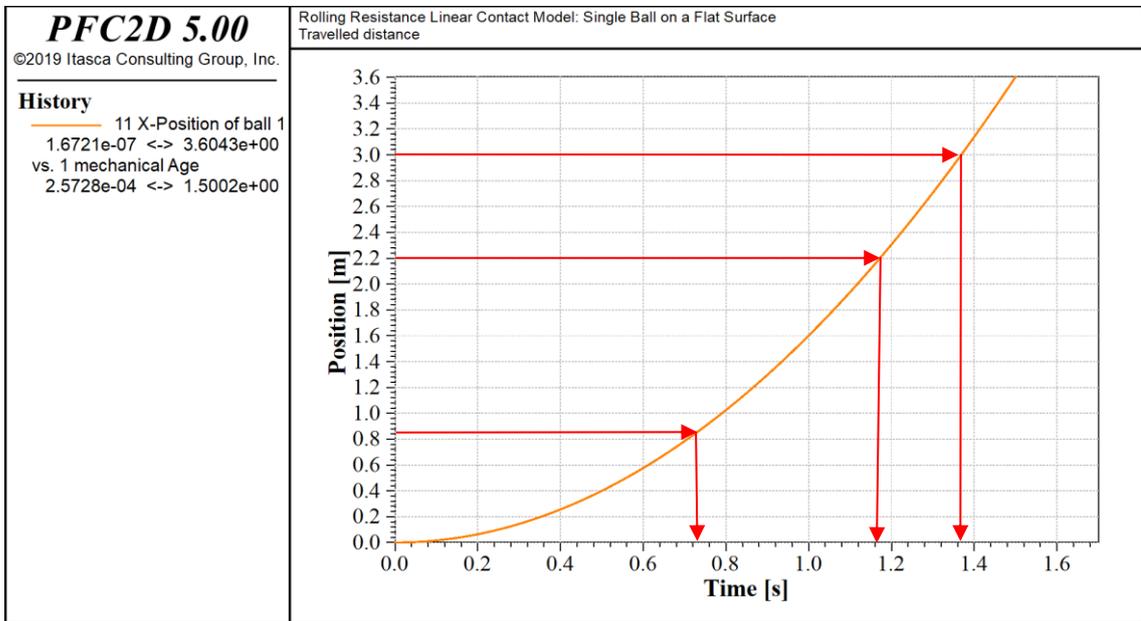


Figura 89: Spostamenti del provino cavo in metallo con attrito pari 0.2

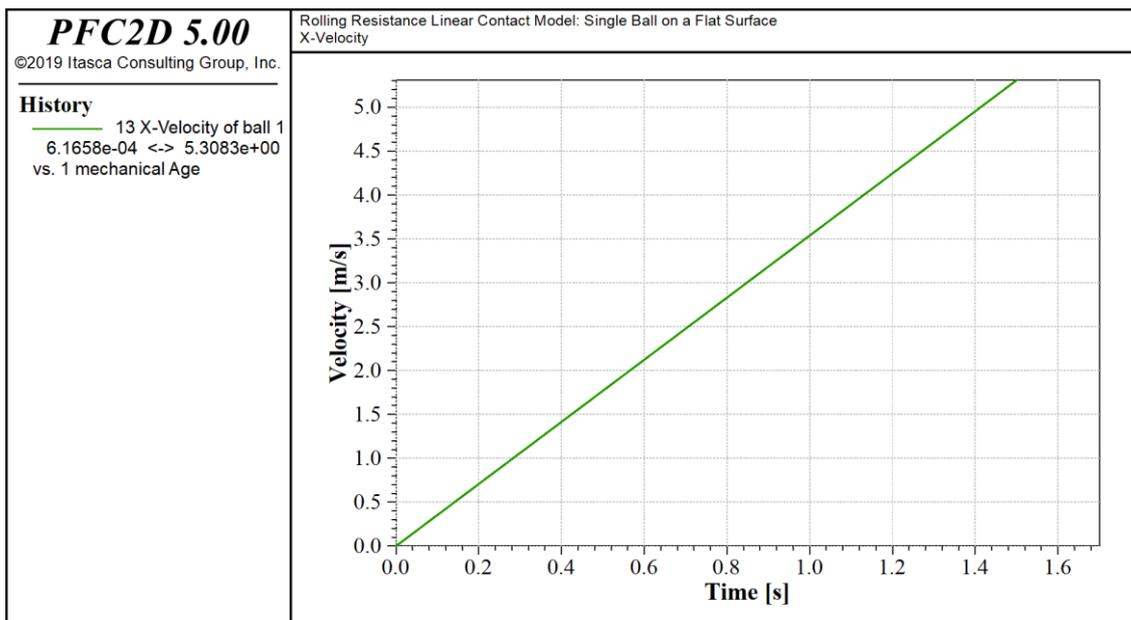


Figura 90: Velocità del provino cavo in metallo con attrito pari 0.2

6.3 ANALISI PREDITTIVA DEL COMPORTAMENTO DI PIÙ OGGETTI DELLO STESSO MATERIALE

Grazie alle analisi precedenti, dalle quali è stato possibile ricavare il valore di attrito che si sviluppa tra provino e canale durante la fase di rotolamento, si possono eseguire delle analisi numeriche per predire il comportamento di più oggetti all'interno del canale.

Con lo scopo di effettuare in futuro delle ulteriori prove sul modello fisico sono state eseguite delle analisi numeriche nelle quali viene simulato il rotolamento di più oggetti che hanno le stesse caratteristiche del provino cavo in metallo. La configurazione utilizzata è la stessa delle prove passate, ovvero con una pendenza del canale pari a 30° e un valore di attrito, ricavato in precedenza, pari a 0.2. Dapprima viene effettuata una simulazione che prevede la modellazioni di tre elementi e successivamente il numero viene aumentato a cinque. Le disposizioni iniziali degli elementi vengono riportate rispettivamente in **Figura 91** e **Figura 92**.

L'analisi restituisce in output l'andamento degli spostamenti e della velocità di ogni singolo elemento in funzione del tempo.

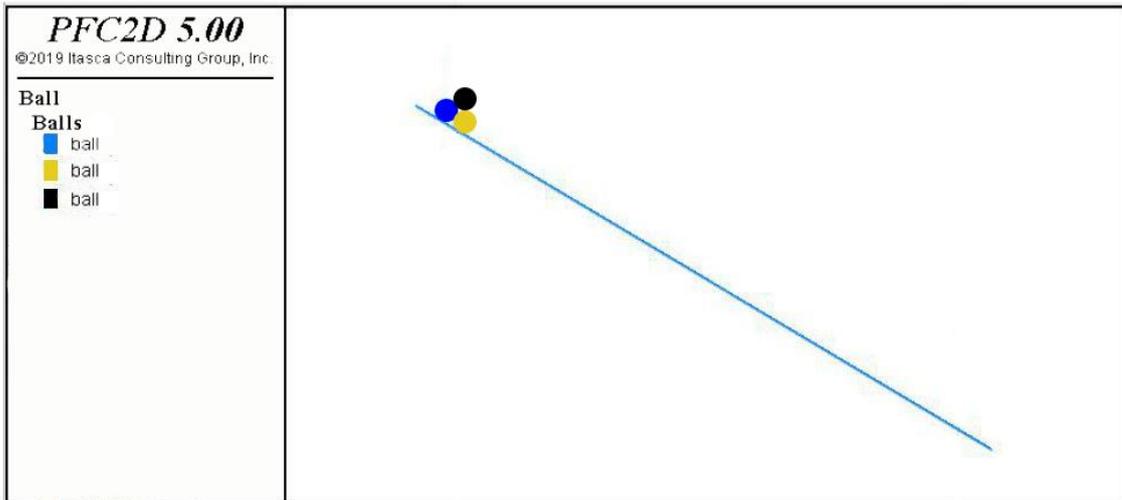


Figura 91: Modello dell'analisi numerica con tre elementi in PFC^{2D}

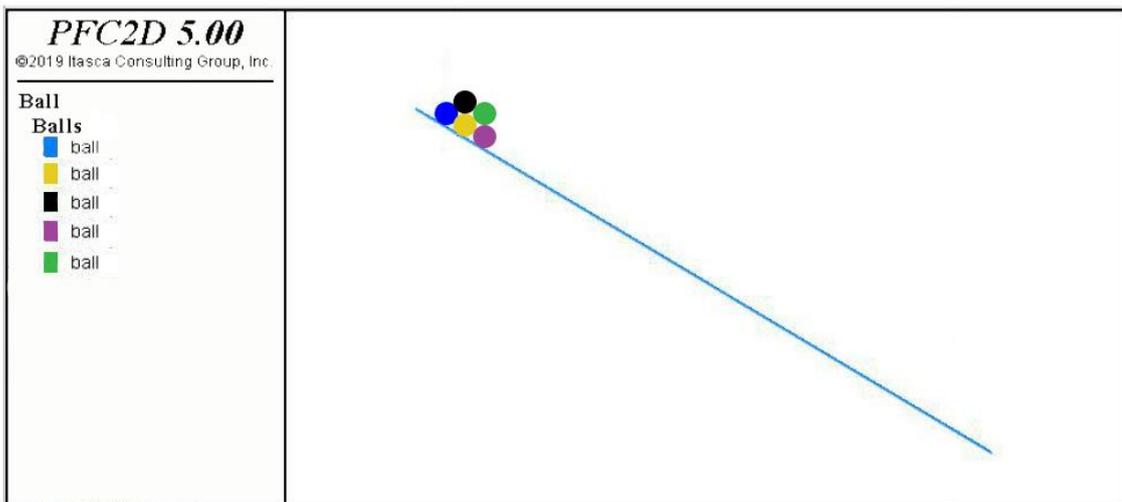


Figura 92: Modello dell'analisi numerica con cinque elementi in PFC^{2D}

Dall'analisi delle velocità nella prima simulazione (**Figura 93**), si nota subito come l'elemento più a monte (in blu) sia quello che, nella fase iniziale, è soggetto ad un'accelerazione minore rispetto agli altri due elementi. Questo è probabilmente dovuto al fatto che il suo moto è impedito dalla presenza e dal contatto con gli altri elementi. Dopo una prima crescita lineare, si nota un cambio di pendenza (circa 0.24 s) ed un aumento più repentino delle velocità. Verosimilmente, questo cambio di pendenza può essere associato al momento in cui i tre elementi si trovano completamente distaccati tra

loro. Situazione contraria si ritrova nel provino posto più a valle (in giallo), dove inizialmente la velocità ha una pendenza maggiore a causa dei provini più a monte che tendono a spingerlo. Dopo il distacco tra gli elementi c'è una diminuzione nella pendenza della retta della velocità. Per il provino posto sopra agli altri due (in nero) si nota inizialmente una velocità intermedia rispetto a quelle degli altri elementi e dopo il distacco si registra un andamento variabile, presumibilmente dovuto al fatto che tale elemento, dopo il distacco, tende a rimbalzare sulla superficie del canale. Ragionevolmente, dopo un sufficiente lasso di tempo, quando i provini si trovano completamente distaccati, la velocità associata ad ognuno di essi aumenta nella stessa maniera e le tre curve sono parallele tra loro.

Inoltre in **Figura 94** viene riportato l'andamento degli spostamenti che conferma quanto evidenziato dal grafico della velocità.

Le stesse considerazioni possono essere fatte per l'analisi con cinque elementi, dove si riscontrano gli stessi andamenti di prima sia per gli elementi posti a contatto con il canale, sia per quelli posti al di sopra degli altri elementi (**Figura 95 e Figura 96**).

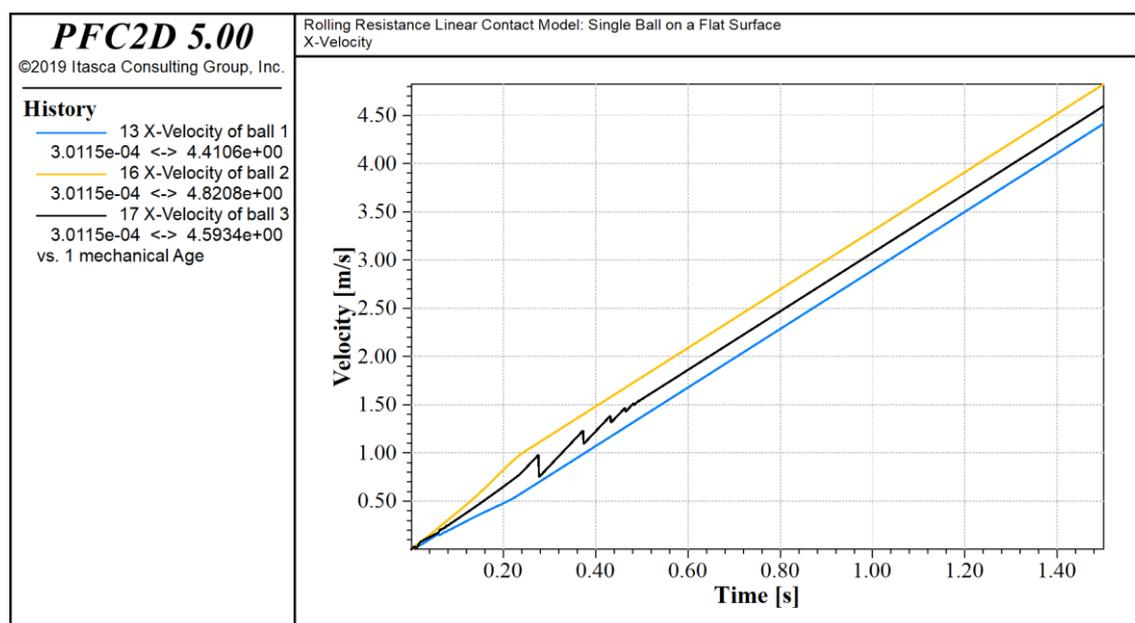


Figura 93: Velocità in funzione del tempo nella simulazione con tre elementi

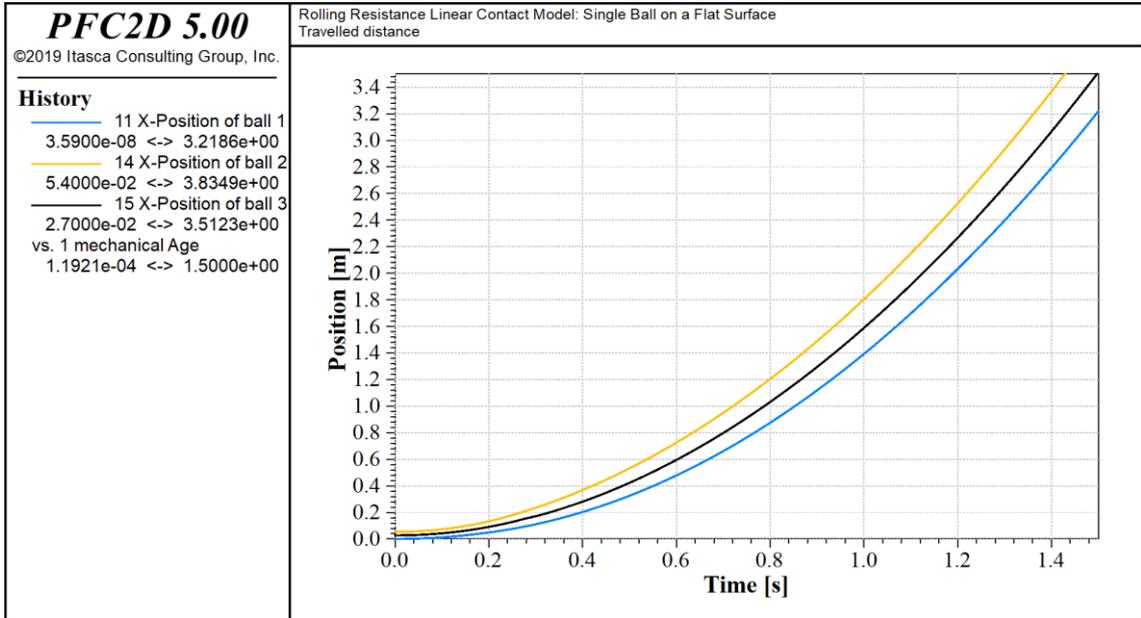


Figura 94: Spostamenti in funzione del tempo nella simulazione con tre elementi

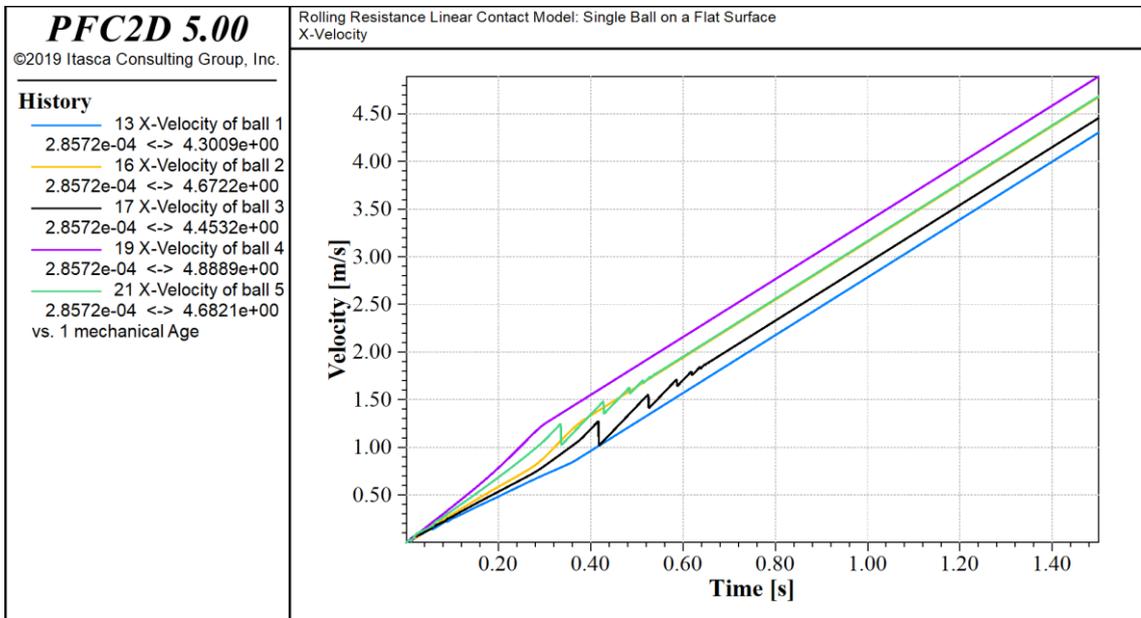


Figura 95: Velocità in funzione del tempo nella simulazione con cinque elementi

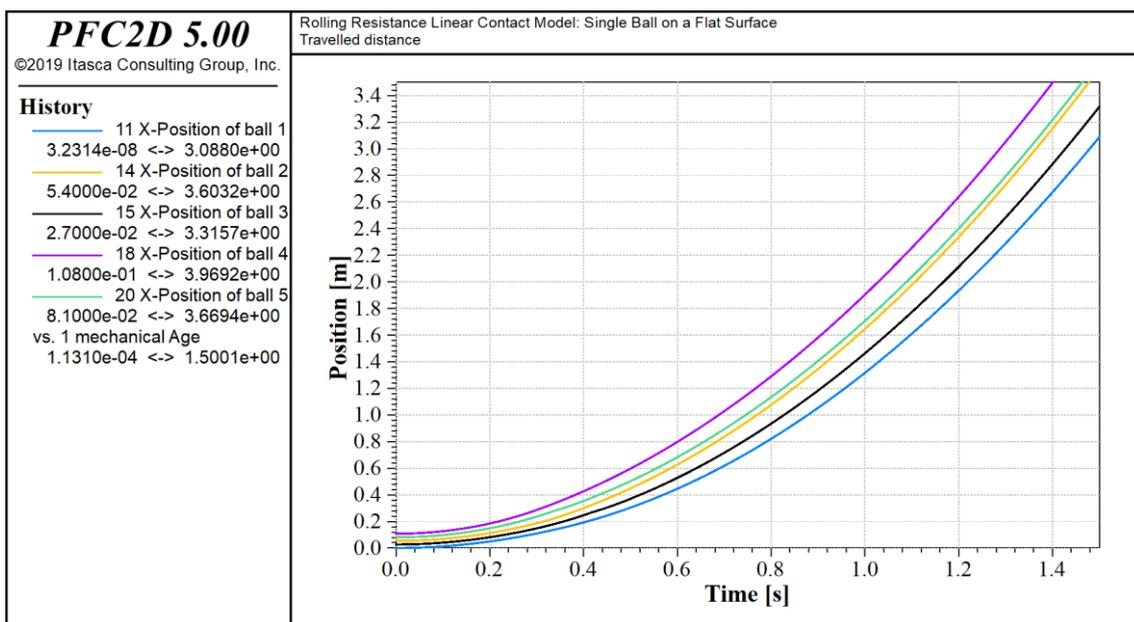


Figura 96: Spostamenti in funzione del tempo nella simulazione con cinque elementi

Queste analisi dovranno quindi essere confrontate in futuro con prove fisiche per valutare se la fibra ottica riesce a rilevare il passaggio dei provini. Dai grafici è possibile predire a quali istanti di tempo ci si aspetta il passaggio di ogni provino nelle diverse sezioni (sia nella prima che nella seconda configurazione) poste rispettivamente a 84, 150, 220 e 300 cm dalla sommità del canale. I tempi forniti dall'analisi sono riportati in **Tabella 19**.

Tabella 19: Tempi di passaggio nelle sezioni di interesse ricavati dalle due analisi numeriche

	3 Elementi			5 Elementi				
Sezione	Ball 1	Ball 2	Ball 3	Ball 1	Ball 2	Ball 3	Ball 4	Ball 5
84 cm	0.80 s	0.65 s	0.72 s	0.82 s	0.70 s	0.76 s	0.62 s	0.67 s
150 cm	1.04 s	0.90 s	0.98 s	1.08 s	0.94 s	1.02 s	0.88 s	0.92 s
220 cm	1.26 s	1.12 s	1.18 s	1.28 s	1.17 s	1.22 s	1.08 s	1.15 s
300 cm	1.44 s	1.30 s	1.38 s	1.48 s	1.36 s	1.44 s	1.30 s	1.34 s

7 CONCLUSIONI

Nell'ambito del presente studio sono affrontate le fasi di progettazione e realizzazione di un modello fisico a scala di laboratorio per lo studio di sistemi di monitoraggio per debris flows e le successive analisi che si sono potute effettuare grazie alla sua costruzione.

Il modello fisico a scala di laboratorio che è stato realizzato è stato impiegato per indagare le potenzialità della fibra ottica come sensore di monitoraggio e i dati registrati durante le simulazioni in scala sono stati confrontati con i risultati derivanti da analisi video e analisi numeriche.

Il particolare, questo studio ha lo scopo di analizzare i dati monitorati attraverso un sistema di fibre ottiche distribuite e un analizzatore di polarizzazione, il quale registra le variazioni di polarizzazione della luce che viaggia all'interno della fibra ottica causate da una perturbazione del cavo stesso.

Gli esperimenti sono stati effettuati disponendo la fibra ottica trasversalmente all'asse del canale in tre sezioni e facendo rotolare, all'interno dello stesso, dei provini cilindrici di diverse dimensioni e diverso materiale. Il provino, passando al di sopra della fibra ottica, perturba lo stato di polarizzazione (SOP) della luce che può essere analizzato attraverso i parametri di Stokes o gli spostamenti del SOP sulla superficie della sfera di Poincaré (di conseguenza anche la velocità angolare associata a tale spostamento). Dalle simulazioni effettuate, sebbene non si sia osservata una ripetitività nei risultati, in alcuni casi si sono ottenuti esiti soddisfacenti che indicano il passaggio del provino al di sopra delle tre sezioni di fibra ottica. In primo luogo la causa può attribuirsi ai campioni utilizzati, i quali non riescono a provocare perturbazioni sufficientemente nette al loro passaggio e, di conseguenza, i dati registrati sono molto confusi perché il segnale è disturbato da un rumore di fondo dovuto alle vibrazioni proprie del canale.

In ogni caso, al fine di valutare l'affidabilità dei dati monitorati dalla fibra ottica, si è svolto un confronto con altri tipi di analisi.

L'analisi video, così come l'analisi numerica, valida i dati ottenuti dal monitoraggio attraverso la fibra ottica. Infatti, in tutti i casi esaminati, si riesce a trovare una corrispondenza tra i dati registrati nei tre tipi di analisi.

Un secondo aspetto positivo del sistema esaminato, derivante dalle analisi svolte, è che in alcuni casi si è registrato il passaggio del provino anche in sezioni in cui non era disposta la fibra (superficie di separazione tra i pannelli) e questo fa pensare che tale sistema potrebbe rilevare il passaggio di un debris flow non solo attraverso il contatto diretto tra flusso e fibra, ma anche attraverso le vibrazioni indotte nel terreno dal suo passaggio.

Lo studio effettuato evidenzia quindi come un sistema di monitoraggio basato sull'analisi della polarizzazione della luce all'interno di un cavo di fibra ottica abbia grandi potenzialità e che i dati ottenuti fanno ben sperare di poter utilizzare in futuro questo strumento per il rilevamento di debris flows. Pertanto è necessaria la prosecuzione della campagna sperimentale per ottenere risultati attendibili da simulazioni più complesse. Nonostante il confronto tra le analisi restituisca risultati positivi, le simulazioni effettuate sono poco realistiche per simulare il passaggio di un debris flow. La sperimentazione, prima di procedere alla sperimentazione in sito, ha bisogno di riuscire ad ottenere dati affidabili e sistematici ricreando situazioni reali attraverso l'utilizzo di una miscela di blocchi, terreno granulare ed acqua per rappresentare al meglio il passaggio una colata detritica.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Johnson e J. Rodine, «Debris Flow,» in *Slope Instability*, 1984, pp. 257-361.
- [2] J. E. Costa, «Physical Geomorphology of Debris Flows,» *Developments and Applications of Geomorphology*, pp. 268-317, 1984.
- [3] R. M. Iverson, «The physics of debris flows,» *Reviews of Geophysics*, vol. 35, n. 3, pp. 245-296, 1997.
- [4] D. VanDine, «Debris flow control structures for forest engineering,» Victoria, British Columbia, 1996.
- [5] S. Crema, *Hydrologic control on the triggering and magnitude of debris flows in alpine catchments*, Università degli Studi di Padova.
- [6] R. A. Bagnold, «Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear,» *Royal Society*, 1954.
- [7] M. Coussot e M. Meunier, «Recognition, classification and mechanical description of debris flows,» *Earth-Science Reviews*, vol. 40, pp. 209-227, 1996.
- [8] A. Johnson, *A model for debris flow*, 1965.
- [9] A. Johnson, *Physical processes in geology*, Freeman, 1970.
- [10] M. Arattano, L. Marchi, R. Genevois, M. Berti, A. Simoni, P. R. Tecca e M. Bonte, «Field monitoring and real time management of debris flows,» *European Project "Debris Flow Risk" (N. ENV4960253), Final Report, 30 p.*, 1999.
- [11] A. Johnson, «Field methods for estimating rheological properties of debris flow,» University of Cincinnati, 1979.

- [12] M. Watanabe e H. Ikeya, «Investigation and analysis of volcanic mud flows on Mt Sakurajima, Japan,» in *Erosion and Sediment Transport Measurement*, Florence Symposium, 1981.
- [13] V. D'Agostino, «Dimensionamento delle opere di protezione dalle colate detritiche,» in *Sistemazione dei bacini montani e difesa del suolo*, Castrolibero, Nuova Bios, 2008, pp. 605-623.
- [14] M. Fugazza, *Sistemazione dei bacini montani*, Università degli Studi di Pavia, A.A. 2010-2011.
- [15] M. Pirulli, *Slide del corso di "Stabilità dei pendii"*, Politecnico di Torino, 2017/18.
- [16] M. Arattano e L. Marchi, «Systems and Sensors for Debris-flow Monitoring and Warning,» *Sensors*, vol. 8, n. 4, pp. 2436-2452, 2008.
- [17] H. Aulitzky, «The debris flows of Austria,» *Bulletin of the International Association of Engineering*, vol. 40, n. I, pp. 5-13, 1989.
- [18] Y. Itakura, K. Ogawa, H. Suwa e K. Mizuhara, «Trends and fluctuation of the surface-velocity of debris flow measured by a non-contact speed sensor with a spatial filter,» in *Fluid control and measurement*, Tokyo, Pergamon Press, 1985, pp. 781-786.
- [19] N. Caine, «The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows,» *Geografiska Annaler*, pp. 23-27.
- [20] Y. Itakura, H. Inaba e T. Sawada, «A debris-flow monitoring devices and methods bibliography,» *Natural Hazards and Earth System Science*, vol. 5, n. 6, pp. 971-977, 2005.
- [21] A. Badoux, C. Graf, J. Rhyner, R. Kuntner e B. W. McArdell, «A debris-flow alaram system for the Alpine Illgraben catchment: design perf,» *Nat Hazards*, pp. 517-539, 2009.

- [22] M. Hurlimann, V. Coviello, C. Bel, X. Guo, M. Berti, C. Graf, J. Hubl, S. Miyata, J. Smith e Yin H-Yuan, «Debris-flow monitoring and warning: review and examples,» *Earth-Science Reviews*, 2019.
- [23] A. Barrias, J. Casas e S. Villalba, «A review of Distributed Optical Fiber Sensors for Civil Engineering Applications,» *Sensors*, 2016.
- [24] A. Hartog, «An introduction to Distributed Optical Fibre Sensors,» *CRC Press*, 2017.
- [25] N. Rotundo, Optical Fiber Sensing: OTDR and Polarimetry to design a warning system for debris flows and snow avalanches, Politecnico di Torino: Tesi di laurea magistrale in Communications and Computer Networks Engineering, A.A. 2018-2019.
- [26] «https://it.wikipedia.org/wiki/Fibra_ottica#Cavo_in_fibra_ottica,» [Online].
- [27] «<https://www.thefoa.org/tech/ref/basic/fiber.html>,» [Online].
- [28] «<https://community.fs.com/blog/how-to-realize-multimode-to-single-mode-fiber-conversion.html>,» [Online].
- [29] H. Pei, P. Cui, J. Yin, H. Zhu, X. Chen, L. Pei e D. Xu, «Monitoring and Warning of Landslides and Debris Flows Using an Optical Fiber Sensor Technology,» *Journal of Mountain Science*, 2011.
- [30] «<http://web.inge.unige.it/DidRes/Fisica/Polar.pdf>,» [Online].
- [31] Novoptel PM1000 Polarimeter, User Guide.
- [32] S. Eu, S. Im, D. Kim e K. W. Chun, «Flow and deposition characteristics of sediment mixture in debris flow flume experiments,» *Forest Science and Technology*, vol. 13, n. 2, pp. 61-65, 2017.
- [33] F. Wang, X. Chen, J. Chen e Y. You, «Experimental study on a debris-flow drainage channel with different energy dissipation baffles,» *Engineering Geology*, pp. 43-51, 2017.

- [34] R. Valentino, G. Barla e L. Montrasio, «Experimental Analysis and Micromechanical Modelling of Dry Granular Flow and Impacts in Laboratory Flume Tests,» *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 41, n. 1, pp. 153-177, 2008.
- [35] R. Valentino, G. Barla e L. Montrasio, «Micromechanical modelling of dry granular flow and impacts in laboratory flume tests,» in *Prediction, analysis and design in geomechanical applications*, 11th Int. Conf. of IACMAG, Bologna, 2005.
- [36] Itasca, Itasca's Particle Flow Documentation (User Manual), 2017.
- [37] «Modellazione numerica del problema fisico nel software PFC2D in collaborazione con Yihan Du,» Anhui Polytechnic University, Wuhu, China.
- [38] M. Arattano e F. Moia, «Monitoring the propagation of a debris flow along a torrent,» *Hydrological Sciences Journal*, vol. 44, n. 5, pp. 811-823, 1999.
- [39] L. Marchi, M. Arattano e A. M. Deganutti, «Ten years of debris-flow monitoring in the Moscardo Torrent (Italian Alps),» *Geomorphology*, vol. 46, pp. 1-17, 2002.
- [40] T. C. Pierson e J. E. Costa, «A rheologic classification of subaerial sediment-water,» *Geology Society of America: Reviews in Engineering Geology, Volume VII*, 1987.