Capitolo 4

Sperimentazione

L'apparato e le procedure sperimentali prova utilizzate sono di tipo non convenzionale, sebbene possano essere descritte con semplicità. La procedura complessiva consiste di una collezione di operazioni classificabili in più fasi: la preparazione dei provini, l'acquisizione delle immagini contemporaneamente all'esecuzione delle prove, e la successiva estrazione delle misure dalle immagini tramite la tecnica PIV. In questo capitolo sono descritte le prime due tra queste fasi; la procedure di estrazione delle misure è stata infatti già presentata in senso astratto nel Capitolo 3 mentre i particolari della sua applicazione al caso specifico, per unità e coerenza di contenuti, sarà discussa nel Capitolo 5. Assieme ai particolari tecnici delle prove sono commentate le figure qualitative dei processi deformativi come esse apparivano a chi osservava le sperimentazioni dal vivo. È riportato infine un approfondimento di queste figure qualitative, consentito dalla semplice visualizzazione delle immagini acquisite.

4.1 Modelli di pendio

Con riferimento al primo utilizzo sperimentale riportato in letteratura scientifica (*Schneebeli, 1956*), si denomina comunemente *materiale analogico di Schneebeli*, un analogo bidimensionale di un materiale granulare tridimensionale, ottenuto per assemblaggio di un insieme di cilindri in luogo di un insieme di grani. Con un materiale di questo tipo sono stati realizzati provini a forma di pendio, in piccola scala, successivamente sottoposti a sollecitazioni diverse, i cui campi di spostamento incrementale sono stati misurati con la tecnica di fotogrammetria digitale PIV. I provini sono stati formati per deposizione manuale, in pila, di cilindri di cloruro di polivinile (PVC); un campione di cilindri appare in Figura 4.1; il rapporto tra un qualsiasi lato dei provini ed il diametro dei cilindri oscilla tra $2.7 \cdot 10^{-3}$ e $1.4 \cdot 10^{-2}$. Nel presente lavoro si prescinde da ogni considerazione di scala, ovvero circa la rappresentatività dei modelli nei confronti di pendii reali; si intende infatti unicamente valutare l'efficacia della tecnica PIV, nei confronti dello specifico materiale.

I cilindri hanno lunghezza pari a 60.0 mm; dall'analisi su di un campione di 317 elementi i diametri sono risultati distribuiti attorno a tre valori principali: 1.63 mm, 2.85 mm, 3.30 mm, con varianze rispettivamente di 0.08 mm, 0.15 mm, 0.08 mm; la curva granulometrica del materiale è riportata in Figura 4.2. Il valore di indice dei vuoti e_0 in corrispondenza del quale i provini erano stati formati è risultato pari a 0.224, prossimo al campo di valori indicato da *Bilotta et alii* (2002) per sperimentazioni effettuate sullo stesso materiale: $0.240 \leq e_0 \leq 0.247$. Gli stessi autori effettuano una serie di prove biassiali a pressione laterale costante, tra 50KPa e 100KPa a seconda della prova; essi misurano $23.2 \leq \varphi_p \leq 26.4$, e $19.3 \leq \varphi_c \leq 21.1$, dove con φ_p e φ_c sono indicati, rispettivamente, l'*angolo d'attrito di picco* e l'*angolo*

Figura 4.1: Campione del materiale utilizzato. I cilindri hanno lunghezza pari a 60.0 mm e diametri distribuiti intorno a tre valori principali: 1.63 mm, 2.85 mm, 3.30 mm.

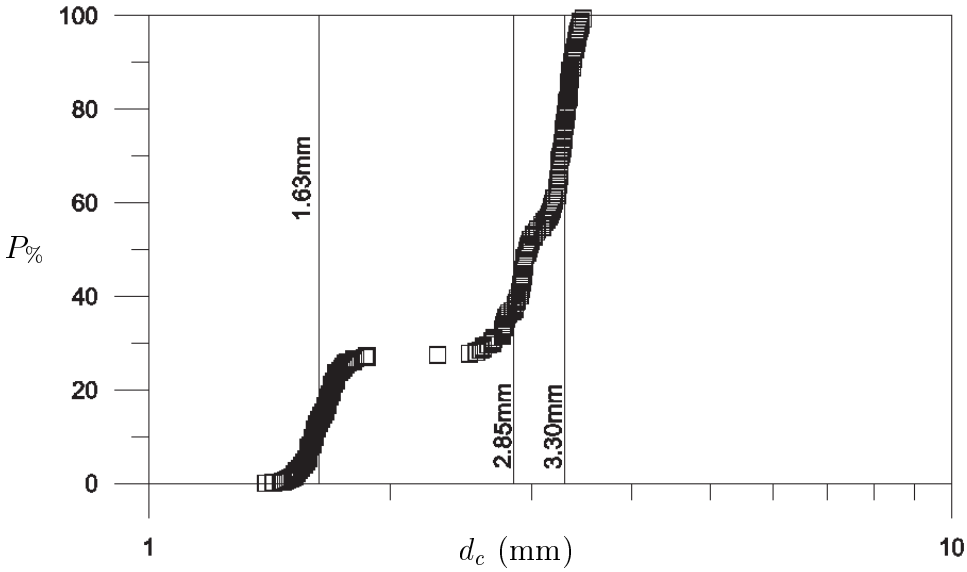

Figura 4.2: Curva granulometrica per il materiale granulare bidimensionale: la percentuale in peso del passante $P_{\%}$, in funzione del diametro d_c dei cilindri. La percentuale in peso di passante è stata calcolata in base alla distribuzione dei diametri dei cilindri ed al peso specifico del materiale di nucleo.

d'attrito di stato critico. Valori rappresentativi per le caratteristiche fisiche e meccaniche del materiale di nucleo (PVC) sono riportati in Tabella 4.1. Infine, in Figura 4.3 è messa in evidenza la caratterizzazione del materiale ai fini dell'applicazione della tecnica PIV; una frazione di "cilindri traccianti" ha facce colorate in bianco, a contrasto sul sfondo di cilindri con facce grigio scuro (colorazione naturale del materiale).

I provini sono raffigurati nelle fotografie in Figura 4.4 e 4.5 (risp. *Provino 1* e *Provino 2*) e le loro geometrie appaiono schematizzate in Figura 4.6. Per la realizzazione di entrambi si è provveduto a posizionare manualmente i cilindri all'interno dell'apparecchiatura di prova (il sistema meccanico $1\gamma 2\epsilon$, vedi Par. 4.2) procedendo per fasci di poche decine di elementi e formando strati orizzontali successivi. Una stima approssimativa del numero di cilindri all'interno del singolo provino, in base all'indice dei vuoti ed al volume del provino, è di 36000 unità. Per entrambi i provini, al lato obliquo è stata assegnata una pendenza prossima all'angolo di riposo del materiale: si è proceduto formandoli con una prima inclinazione di tentativo e quindi depositando ulteriori cilindri, uno ad uno sulla superficie superiore, sino a causare il rotolamento di pochi elementi superficiali; per iterazioni successive si è raggiunta un'inclinazione finale di 23.6° per il Provino 1, 24.3° per il Provino 2.

4.2 Strumentazione

L'insieme di strumentazioni utilizzate durante le prove consiste di un sistema meccanico per l'applicazione delle condizioni al contorno dei provini e di un sistema ottico-digitale, per l'acquisizione delle immagini. L'analisi fotogrammetrica di queste è stata eseguita in una fase successiva.

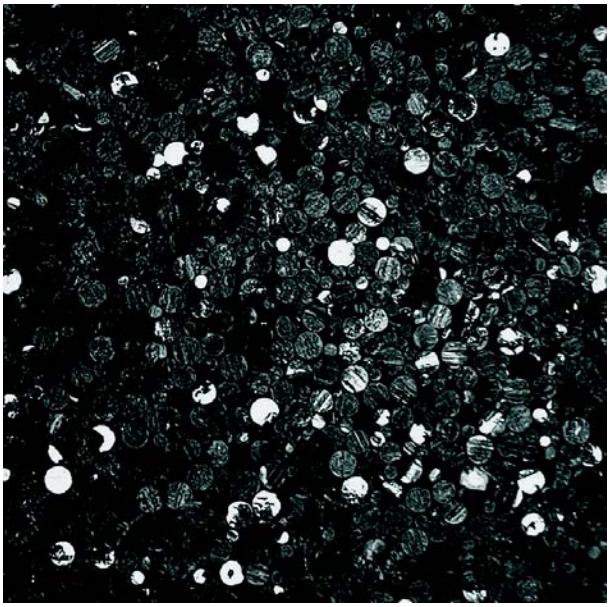

Figura 4.3: Particolare dal prospetto di una pila realizzata con i cilindri di PVC. Le facce bianche di alcuni cilindri contrastano sul fondo di prevalenza grigio scuro, e caratterizzano l'immagine come particelle traccianti.

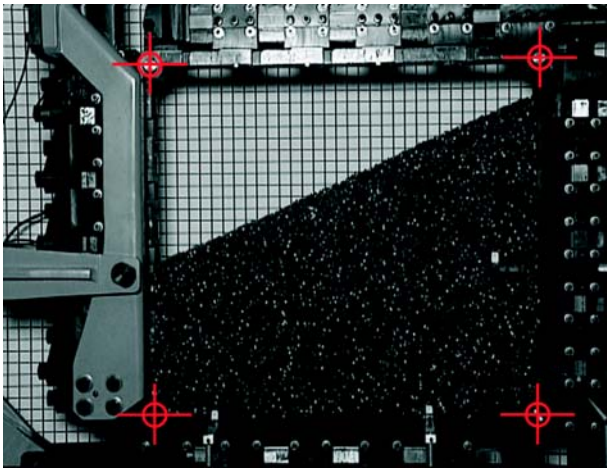

Figura 4.4: Il Provino 1 alloggiato nel sistema meccanico $1\gamma 2\epsilon$, di cui sono evidenziate le cerniere di connessione tra le traverse.

densità	$1.4 \cdot 10^3$ kg/m^3
modulo di Young	$1.5 \cdot 10^3$ MPa
modulo di elasticità tangenziale	$0.6 \cdot 10^3$ MPa
coefficiente di Poisson	0.42
tensione di snervamento a trazione	53 MPa
tensione di rottura a trazione	60 MPa
coefficiente di dilatazione termica	$75 \cdot 10^{-6}$ °C
costo approssimativo	1.50 EUR/kg

Tabella 4.1: Caratteristiche fisiche e meccaniche del cloruro di polivinile (PVC) secondo <http://web.mit.edu>

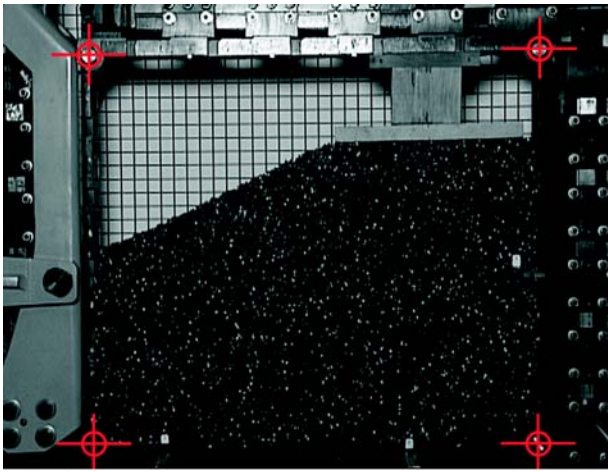

Figura 4.5: Il Provino 2 alloggiato nel sistema meccanico $1\gamma 2\epsilon$, di cui sono evidenziate le cerniere di connessione tra le traverse. È visibile la piastra in legno, in sommità al provino, connessa alla traversa orizzontale superiore.

Il sistema meccanico $1\gamma 2\epsilon$ è specifico per l'esecuzione di prove su materiale di Schneebeli ed è già stato utilizzato in numerosi lavori riportati in letteruatura (vedi *Joer et al.*, 1991, 1992, 1998; *Calvetti et al., 1997*;*Bilotta et al.*, 2002). L'apparecchiatura, che già appare, in parte, in Figura 4.4 e 4.5, è schematizzata in Figuta 4.7: si tratta di un sistema servo-comandato di quattro traverse di acciaio, estensibili, connesse agli estremi da cerniere e confinanti la pila di cilindri. Le cerniere in basso (quelle che vincolano la traversa inferiore) sono obbligate al piano orizzontale; delle due, quella di destra è fissa. Le restanti (due) sono libere nel piano verticale, consentendo ogni estensione ed inclinazione alle traverse laterali ad alla traversa superiore. Un sistema di trasduttori ed attuatori agisce in corrispondenza delle cerniere ed è coordinato da un calcolatore allo scopo di applicare, al contorno della pila, i percorsi di carico o di deformazione desiderati: in condizioni di carico controllato o velocità di deformazione controllata. Le traverse possono sicuramente essere considerate come travi rigide a flessione e taglio se, nel campo delle sollecitazioni raggiunte durante le prove, la loro deformabilità è paragonata a quella dei modelli.

Per l'acquisizione delle immagini durante le prove è stata utilizzata una telecamera digitale di caratteristiche professionali (modello Panasonic AJ-D700E, 3 CCD da $1/2''$, tecnologia *on-chip*, nastro DVCPRO 25, risoluzione orizzontale di 750 linee, che ha consentito una frequenza di acquisizione massima di 25 ftg/s, pari allo standard per le apparecchiature per ripresa televisiva o cinematografica. Per riversare le immagini dal nastro digitale in un disco rigido, e per selezionare sotto-sequenze delle sequenze complessive di immagini per le due prove, è stata utilizzata una stazione di elaborazione di immagini con caratteristiche professionali (hardware *Matrox Digisuite*; software *Edit 6.0, Discrete Logic*). Infine, per ottenere le misure dei campi

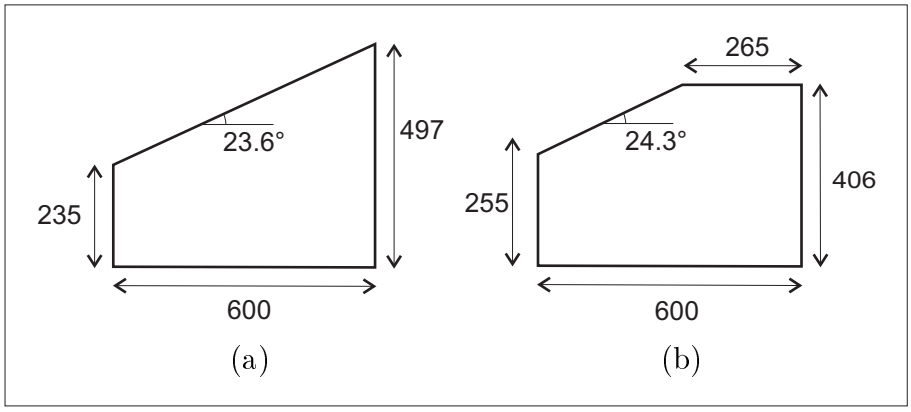

Figura 4.6: Geometria del Provino 1 (a) e 2 (b) con le relative misure in millimetri.

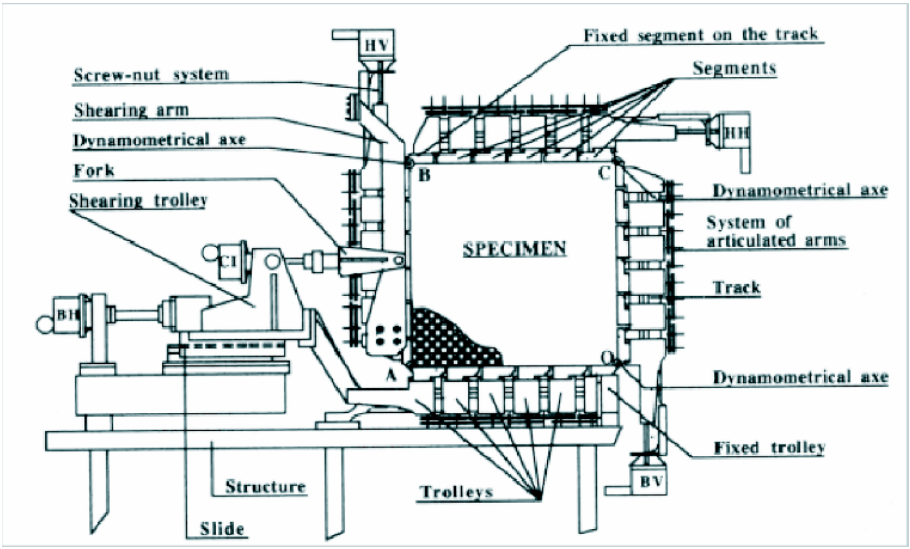

Figura 4.7: (Da *Joer et al.*, 1992) Schema del sistema meccanico $1\gamma 2\epsilon$. È possibile distinguere il telaio di traverse incernierate (cerniere libere A, B, C e cerniera fissa O) ed il meccanismo a cremagliere che consente la loro elongazione. Sono rappresentati i cinque motori (sigle CI, BH, BV, HV, HH).

di spostamento, le sequenze così estratte sono state analizzate su di un calcolatore commerciale (processore *Pentium III*), con il software Davis 6.0 (vedi Cap. 3), che implementa gli algoritmi e le procedure della tecnica PIV.

4.3 Esecuzione e osservazione delle prove

Le prove che qui si descrivono, denominate nel seguito *Prova 1* e *Prova 2*, sono state eseguite (risp.) sul Provino 1 e sul Provino 2 di cui si è detto sopra; ad essi sono state imposte condizioni al contorno differenti che hanno condotto a scenari di deformazione e rottura con caratteristiche non assimilabili. Per ciascuna delle due prove, altre identiche erano state condotte in precedenza, sulle quali non erano state effettuate misurazioni; esse avevano confermato tuttavia la ripetibilità dei fenomeni osservati ad occhio nudo. Si riportano qui di seguito le osservazioni visive della Prova 1 e della Prova 2.

Il Provino 1 era stato realizzato con una geometria il più possibile regolare, in cui l'unico elemento di complessità era il lato obliquo. Si è avviata la prova con il provino in condizioni prossime al limite della stabilità, poiché il lato inclinato era stato modellato con un angolo pari all'angolo di riposo del materiale (vedi Par. 4.1). Si è voluta indurre una deformazione distorsionale, all'interno del provino, che fosse la più omogenea possibile, evitando fenomeni di localizzazione "impliciti" a partire dalle condizioni al contorno. A questo scopo, il processo deformativo è stato guidato obbligando le traverse orizzontali ad una rotazione simultanea (che le ha mantenute parallele) attorno alle cerniere di base (vedi Fig. 4.8a). È stata imposta loro una velocità angolare pari a $5 \cdot 10^{-4}$ rad/s: tale da assicurare un'evoluzione quasi-statica sul bordo. Sono state mantenute costanti l'inclinazione (orizzontale) delle traverse superiore ed inferiore e la lunghezza di ciascuna traversa. La

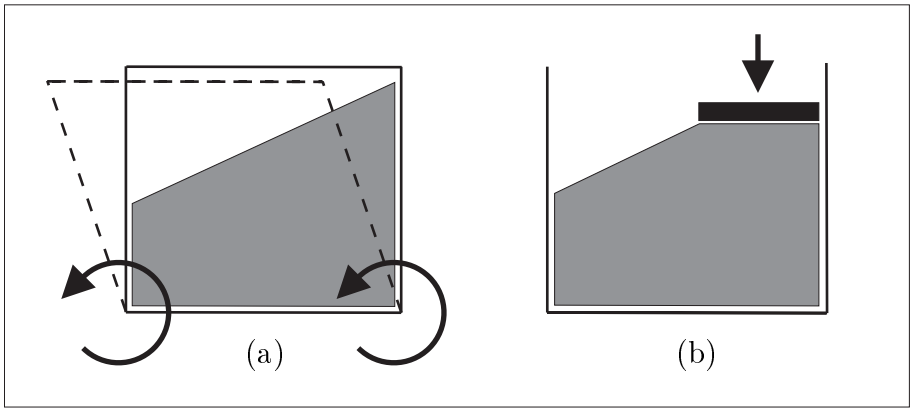

Figura 4.8: Condizioni al contorno nella Prova 1 (a) e nella Prova 2 (b). Le traverse opposte rimangono parallele in entrambe le prove.

prova ha avuto una durata di 400 s. Ad un'osservazione ad occhio nudo, in fase di esecuzione della prova, la deformazione indotta nel provino è apparsa essenzialmente uniforme, con spostamenti nel volume controllati dagli spostamenti sul bordo e con un progressivo aumento della pendenza accompagnato da trascurabili movimenti superficiali; la continuità e l'uniformità di questo comportamento sono state interrotte da due fenomeni d'instabilità di diversa importanza. Il primo, più rilevante, è stato osservato dopo 184 s: un movimento accelerato ha avuto origine nella parte sommitale del pendio e si è propagato verso valle nella forma di un flusso granulare; tale fenomeno ha interessato uno strato parallelo alla superficie con spessore di pochi centimetri, *corrispondenti grossolanamente ad una decina di grani*, ed ha portato ad un omogeneo rimodellamento di pochi gradi della pendenza (vedi Fig. 4.9). Un secondo movimento accelerato è stato osservato a 368 s dall'inizio della prova; esso ha presentato caratteristiche qualitative simili al precedente, ma ha interessato un volume più ridotto, ed è rimasto confinato alla sommità del pendio.

Il Provino 2 è stato modellato in maniera simile al precedente; da quello si distingueva essenzialmente per l'aggiunta di un tratto di perimetro orizzontale, posto alla sommità del piano inclinato, destinato ad alloggiare la piastra di carico. La pendenza iniziale del lato inclinato, anche in questo caso, era prossima all'angolo di riposo del materiale. Il processo deformativo è stato guidato imponendo la traslazione verticale verso il basso della piastra in legno posta sul tratto orizzontale di sommità (vedi Fig. 4.8b); la sua velcità, costante durante la prova, è stata imposta pari a $8.6 \cdot 10^{-2}$ mm/s — di nuovo, tale da assicurare condizioni quasi-statiche sul bordo — ed il moto le è stato trasmesso dalla traversa verticale sovrastante cui era stata resa solidale. L'inclinazione di ogni traversa è stata mantenuta costante (orizzontale o verticale) ed è stato consentito solamente l'accorciamento delle traverse laterali (verticali), necessario all'abbassamento della traversa orizzontale superiore. La prova ha avuto una durata di 976 s, durante la quale è stata osservata una mobilitazione lenta e progressiva degli elementi nei volumi prossimi alla piastra; si è gradualmente evidenziata, persistendo sino al termine della prova, la geometria di collasso tipica della teoria della plasticità, con una regione superiore, modellata secondo le *linee caratteristiche*, in scorrimento sulla restante porzione del provino (vedi Fig. 4.10). Pochi ed appena apprezzabili fenomeni di superficie hanno accompagnato il regolare decorso delle deformazioni. In ognuna delle due prove, per le rispettive durate, le immagini sono state registrate su nastro alla massima frequenza di acquisizione consentita dalla macchina da presa: 25 ftg/s.

4.4 Osservazione delle sequenze

Dalla sequenza digitale complessiva della Prova 1, conservata su nastro magnetico, tre sotto-sequenze principali sono state estratte e riversate su disco rigido (vedi Tab. 4.2 e CD allegato); di queste, la Sequenza *essai1* si riferisce all'intera prova, mentre la Sequenza *3mn57* e *7mn12* sono relative rispettivamente al primo (maggiore) e al secondo fenomeno d'instabilità di cui si è detto nel Paragrafo 4.3.

Il montaggio in forma accelerata della Sequenza essai1 (A in Tab. 4.3 e CD allegato) ed una sua scansione "manuale", cioè fotogramma per foto-

prova	sequenza	file	da #	a #	ogni	f. acq.
1	essai1	essai1###.tif	001	401	1	1 fm/1 s
1	3mn57	3mn57###.tif	001	375	1	25 fm/1 s
1	7mn12	7mn12##.tif	01	75	1	25 fm/1 s
2	essai2	essai2###.tif	001	975	1	1 fm/1 s

Tabella 4.2: Sequenze originali (vedi CD allegato).

prova	montaggio	file	da #	a #	ogni	vel. esec.
1	A	essai1###.tif	020	400	5	x25
1	B	3mn57###.tif	276	330	1	x1/5
2	C	essai2###.tif	001	971	10	x50

Tabella 4.3: Montaggi A, B e C (vedi CD allegato).

gramma, hanno consentito una più accurata osservazione visiva del processo deformativo, dalla quale non sono però emersi elementi di novità sostanziali rispetto alla prima osservazione dal vivo. La misurazione della distanza in pixel (nell'immagine) tra i punti fissi posizionati in prossimità del provino (precedentemente misurata in mm), ha consentito di determinare il fattore di conversione

$$C_{pix} := \frac{\text{dimensioni lineari nello spazio fisico (mm)}}{\text{dimensioni lineari nel piano dell'immagine (pix)}} ;$$

si è ottenuto in particolare $C_{pix} = 1.26$ pix/mm.[1] È stato possibile misurare con precisione la variazione della pendenza del lato obliquo tra l'istante immediatamente precedente e quello immediatamente successivo al maggiore fenomeno d'instabilità: da 26.0° a 21.9°. La visualizzazione a velocità ridotta della Sequenza 3mn57 (Montaggio B in Tab. 4.3 e CD allegato) relativa al primo fenomeno d'instabilità, accompagnata anche in questo dalla scansione manuale, ha consentito di valutare ulteriori elementi. Un primo fenomeno d'instabilità superficiale, che era stato trascurato a occhio nudo, appare evidente tra il Fotogramma 3mn57_026 e -042: [2] non si risolve in un flusso granulare, ma nel riassesto di una striscia superficiale parallela al pendio, dello spessore di pochi millimetri (mediamente 3-4 cilindri) e di estensione orizzontale pari a circa 8 cm (4 volte il passo della griglia di fondo nell'immagine). Il processo deformativo evolve poi in maniera omogenea sino all'attivazione, tra il Fotogramma 3mn57_275 e -276, di un movimento superficiale ben più consistente, cioè quello a cui si accenna nel Paragrafo

[1] Il valore riportato è il valore medio tra una misura effettuata in direzione verticale ed una in direzione orizzontale; tra queste, ad ogni modo, lo scarto è risultato trascurabile. Rispetto alla notazione adottata nel Capitolo 3, si ha ovviamente $C_{pix} = M^{-1}$.

[2] Si consideri che il lasso temporale che separa i fotogrammi, per la Seq. 3mn57, è di 0.04 s; vedi Tab. 4.2.

4.3. L'innesco del movimento avviene per l'attivazione simultanea dei cilindri in una striscia superficiale delle stesse dimensioni di quella descritta poco sopra; il baricentro di questa nuova zona di attivazione è prossimo alla sommità del pendio, da cui dista circa 22 cm in orizzontale. Successivamente all'innesco, il movimento non si conclude con un semplice riassesto, e la porzione di pendio attivata aumenta progressivamente e consistentemente, pur rimanendo superficiale ed assimilabile ad una striscia; in corrispondenza del Fotogramma 3mn57_307, a circa 1 s dall'innesco, la striscia attivata impegna, nella direzione del suo spessore, circa 12 cilindri, mentre la sua elongazione ha raggiunto l'intera estensione del pendio. Da quando il fronte del volume in movimento impatta contro la traversa verticale sinistra di contenimento (ovvero negli istanti immediatamente successivi al Ftg. 3mn57_307) i volumi attivati rallentano e sedimentano progressivamente da valle a monte. Ad eccezione di pochi cilindri isolati in rotolamento sul pendio, la fase di flusso granulare appare esaurita a partire dal Fotogramma 3mn57_328, dopo circa 2.12 s dall'attivazione del movimento, ovvero circa 0.84 s dopo l'impatto con la traversa. A partire da questo fotogramma, e sino alla fine della sequenza, non sono osservabili altri fenomeni d'instabilità. Per commentare e trasmettere l'impressione visiva del fenomeno d'instabilità si può fare riferimento al cosiddetto *effetto domino*: dall'attivazione simultanea dei cilindri nella zona sommitale del pendio, in maniera continua e progressiva, il fronte dell'insieme in movimento ha attivato i cilindri limitrofi posizionati immediatamente più a valle.

L'osservazione della Sequenza 7mn12, che consiste di un minore numero di fotogrammi, è stata effettuata solamente tramite scansione manuale, senza cioè eseguire un vero e proprio montaggio. È stata possibile qualche ulteriore considerazione sul fenomeno d'instabilità a cui si riferisce. Il mo-

vimento si è attivato in sommità al pendio, immediatamente a ridosso della traversa destra di contenimento. La zona di prima attivazione, evidenziatasi tra il Fotogramma 7mn12_12 e -14, aveva caratteristiche geometriche pari a quelle appena descritte per i movimenti nella Sequenza 3mn57, ma la striscia di cilindri coinvolta nel movimento non è aumentata in dimensioni; essa è semplicemente traslata verso il basso lungo la direzione del lato inclinato, in parte per lo spostamento dei cilindri stessi, in parte per la trasmissione della quantità di moto ai cilindri immediatamente più a valle. Il fronte del movimento, nella fase di arresto, era traslato di circa 8 cm rispetto all'asse orizzontale, rispetto al fronte di prima attivazione.

Relativamente alla prova n. 2, è stata estratta unicamente la sequenza *essai2* (vedi Tab. 4.2 e CD allegato); quest'ultima è stata visualizzata manualmente, e tramite il Montaggio C, in forma accelerata (vedi Tab. 4.3 e CD allegato). Un diverso posizionamento della videocamera ha reso necessario procedere nuovamente alla misurazione del rapporto C_{pix} tra le dimensioni reali del Provino e le dimensioni in pixel della sua immagine digitale; si è ottenuto $C_{pix} = 1.09$ pix/mm. È stato possibile osservare alcune caratteristiche del processo deformativo già riscontrate dal vivo; in particolare è stato possibile apprezzare il progressivo instaurarsi ed il successivo persistere dello schema deformativo di cui si è detto nel Paragrafo 4.3: una progressiva localizzazione della deformazione è apparsa ben osservabile, e si è progressivamente evidenziata la banda di taglio che separava la porzione inferiore del provino, pressoché inattiva, da quella superiore in movimento.

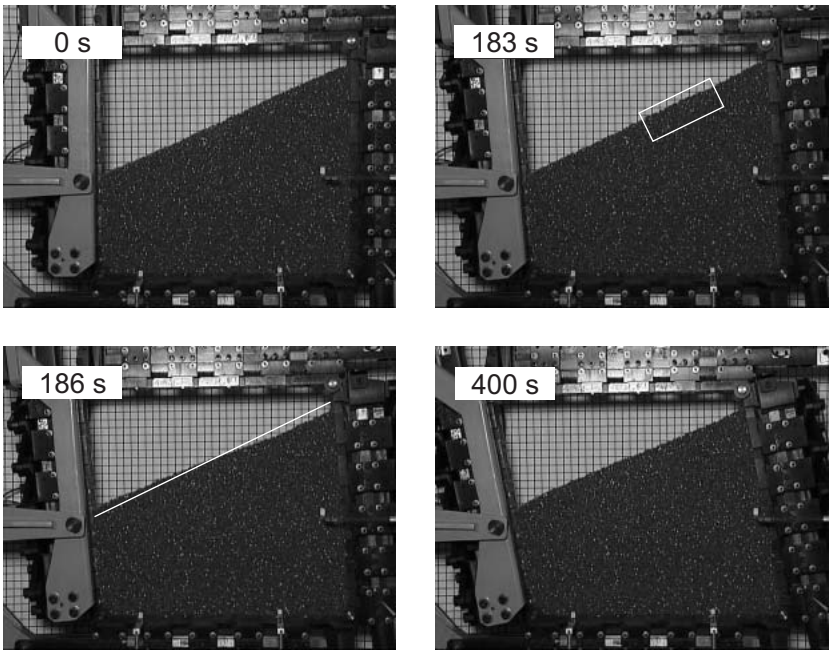

Figura 4.9: Prova n. 1. Il provino è raffigurato ai tempi $t = 0$ s (inizio prova) e $t = 400$ s (fine prova). Sono riportati inoltre le immagini agli istanti immediatamente precedente e successivo al maggiore fenomeno di collasso, cioè per $t = 183$ s e $t = 186$ s. Al ftg. a $t = 183$ s è sovrapposta una cornice rettangolare bianca che limita in maniera indicativa l'ubicazione della zona di prima attivazione del movimento. Al ftg. a $t = 186$ s è sovrapposta una linea retta bianca, che rappresenta l'inclinazione del lato libero del provino prima del fenomeno d'instabilità (cioè a $t = 183$ s).

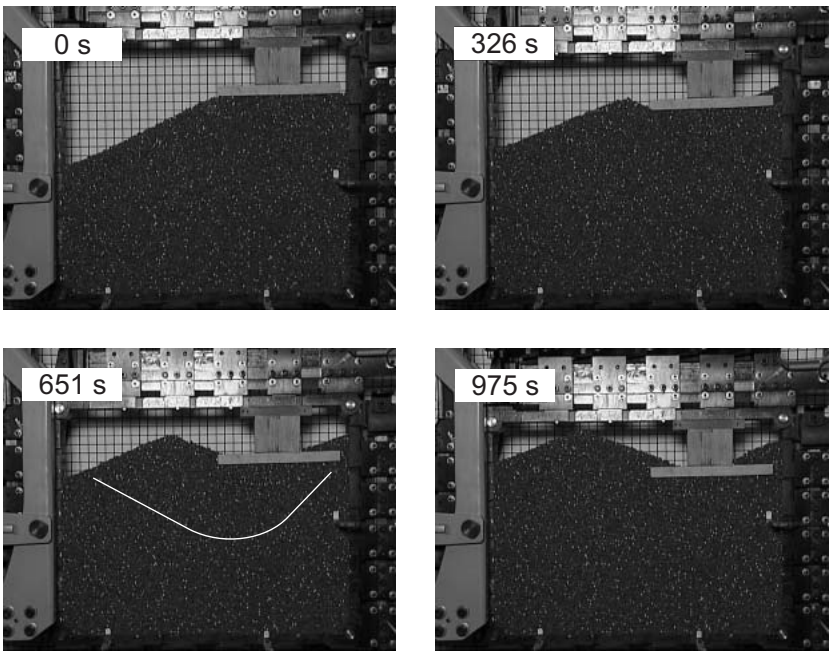

Figura 4.10: Prova 1. Il provino è raffigurato ai tempi $t = 0$ s (inizio prova), $t = 326$ s, $t = 651$ s, $t = 975$ s (fine prova). Al ftg. a $t = 651$ s è sovrapposta una linea bianca che marca in maniera qualitativa ed approssimativa la geometria della porzione superiore del provino, in scorrimento su quella inferiore.