

**FENOMENI DI INTERAZIONE TRA COLATE
DETRITICHE**

Tesi per il conseguimento del titolo di Dottore di Ricerca

Laura Maria Stancanelli



UNIVERSITÀ DI CATANIA

*Dipartimento di Ingegneria
Civile e Ambientale*

Sedi consorziate:



UNIVERSITÀ DI MESSINA

*Dipartimento Ingegneria Civile,
Informatica, Edile, Ambientale
e Matematica Applicata*

Tesi per il conseguimento del titolo

FENOMENI DI INTERAZIONE TRA COLATE DETRITICHE

LAURA MARIA STANCANELLI

TUTOR:
PROF. ENRICO FOTI

CO-TUTOR
PROF. STEFANO LANZONI

SUPERVISORE:
PROF. ANTONINO CANCELLIERE

COORDINATORE DEL DOTTORATO:
PROF. DAMIANO CAFISO

Catania, Dicembre 2012

«Ci sono soltanto due possibili conclusioni: Se il risultato conferma le ipotesi, allora hai appena fatto una misura. Se il risultato è contrario alle ipotesi, allora hai fatto una scoperta.»

Enrico Fermi

INDICE

SOMMARIO	VI
ELENCO DEI SIMBOLI	VIII
1. INTRODUZIONE.....	1
1.1 Posizione del problema	1
1.2 Obiettivi	2
1.3 Metodologia.....	3
1.4 Limiti	3
1.5 Fasi del lavoro svolto	4
2. FENOMENI DI COLATA DETRITICA	7
2.1 Generalità.....	7
2.2 Caratteristiche morfologiche e morfometriche dell'ambiente di sviluppo delle colate detritiche	9
2.3 Condizioni di innesco delle colate detritiche	11
2.4 Valutazione della possibilità di mobilitazione di materiale dai bacini e stima dei volumi mobilitabili dai bacini	13
3. MODELLI REOLOGICI.....	15
3.1 Generalità.....	15
3.2 Il modello Newtoniano	17
3.3 Modello di Bingham	18
3.4 Modello reologico quadratico	20
3.5 Modello di Herschel-Bulkley.....	21
3.6 Modello dilatante	22
3.7 Modello di Voellmy.....	23
4. APPLICAZIONE DI CODICI DI PROPAGAZIONE E DI ARRESTO IN CONDIZIONI IN CONFLUENZA	25
4.1 Generalità.....	25
4.2 Descrizione dei modelli adottati	26
4.2.1 Descrizione del modello FLO-2D.....	26

4.2.2	Descrizione del modello TRENT-2D	29
4.3	Inquadramento geografico del territorio colpito dall'alluvione del 1 ottobre 2009 e descrizione sintetica delle colate verificatisi	30
4.3.1	Bacino idrografico del torrente Giampilieri	30
4.3.1.1	Torrente Loco	33
4.3.1.2	Torrente Sopra Urno e lo scenario prodotto dall'evento 34	
4.3.1.3	Torrente Puntale	36
4.4	Dati di supporto alla modellazione	38
4.5	Determinazione dei pletogrammi relativi alle colate detritiche sviluppate durante l'evento del 1 ottobre 2009	39
4.6	Simulazioni effettuate per la calibrazione dei parametri reologici del Flo-2D	40
4.7	Simulazioni effettuate	53
4.7.1	Dati relativi alla geometria della zona alluvionale	53
4.7.2	Modellazione effettuata tramite il FLO-2D	53
4.7.1	Modellazione effettuata tramite il TRENT-2D	56
4.8	Validazione e confronto dei dati osservati durante gli scenari simulate e quelli riscontrati in situ.	58
5.	PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE DI UN MODELLO FISICO PER LO STUDIO DELLA PROPAGAZIONE E L'ARRESTO IN CONDIZIONE DI CONFLUENZA	61
5.1	Generalità	61
5.2	Definizione della scala del modello fisico	61
5.3	Criteri di progettazione del modello sperimentale	65
5.4	Apparato sperimentale	68
5.5	Descrizione delle caratteristiche del sedimento	70
5.6	Strumenti di misura adottati	70
5.7	Procedura sperimentale	74
5.8	Prove preliminari	75

6.	ESPERIMENTI CONDOTTI.....	77
6.1	Generalità.....	77
6.2	Esperimento 1 ($\alpha=60^\circ$, $\beta=17^\circ$, B->C)	78
6.3	Esperimento 2 ($\alpha=60^\circ$, $\beta=17^\circ$, C->B)	86
6.4	Esperimento 3 ($\alpha=60^\circ$, $\beta=17^\circ$, B=C).....	92
6.5	Esperimento 4 ($\alpha=50^\circ$, $\beta=17^\circ$, B->C)	99
6.6	Esperimento 5 ($\alpha=50^\circ$, $\beta=17^\circ$, C->B)	105
6.7	Esperimento 6 ($\alpha=50^\circ$, $\beta=17^\circ$, B=C).....	111
6.8	Esperimento 7 ($\alpha=50^\circ$, $\beta=17^\circ$, B=C).....	118
6.9	Esperimento 8 ($\alpha=50^\circ$, $\beta=15^\circ$, B->C)	119
6.10	Esperimento 9 ($\alpha=50^\circ$, $\beta=15^\circ$, C->B)	125
6.11	Esperimento 10 ($\alpha=60^\circ$, $\beta=15^\circ$, B=C).....	132
6.12	Esperimento 11 ($\alpha=60^\circ$, $\beta=15^\circ$, B->C)	138
6.13	Esperimento 12 ($\alpha=60^\circ$, $\beta=15^\circ$, C->B)	145
6.14	Esperimento 13 ($\alpha=50^\circ$, $\beta=15^\circ$, B=C).....	151
6.15	Esperimento 14 ($\alpha=90^\circ$, $\beta=15^\circ$, B=C).....	154
6.16	Esperimento 15 ($\alpha=90^\circ$, $\beta=17^\circ$, B=C).....	161
6.17	Esperimento 16 ($\alpha=90^\circ$, $\beta=17^\circ$, B->C)	167
6.18	Esperimento 17 ($\alpha=90^\circ$, $\beta=17^\circ$, C->B)	173
6.19	Esperimento 18 ($\alpha=90^\circ$, $\beta=15^\circ$, B->C)	179
6.20	Esperimento 19 ($\alpha=90^\circ$, $\beta=15^\circ$, C->B)	185
7.	ANALISI DELLE EVIDENZE SPERIMENTALI.....	192
7.1	Generalità.....	192
7.2	Analisi sui profili di propagazione.....	192
7.3	Analisi condotte sui fenomeni di deposito.....	197
7.3.1	Determinazione dei parametri caratteristici dei depositi	197
7.3.2	Analisi sui depositi basate sui profili di rilievo longitudinali.....	200
7.3.3	Analisi sui profili trasversali rilevati nella sezione dove è collocato il centro di massa del deposito di colata. .	205

7.3.4	Analisi dei depositi basate sui parametri caratteristici della colata.....	207
7.3.5	Analisi condotte su esperimenti con stessa tempistica di innesco al variare dei parametri caratteristici della colata.	209
8.	CONCLUSIONI.....	217
	RINGRAZIAMENTI.....	ccxxi
	ELENCO DELLE FIGURE.....	ccxxiii
	ELENCO DELLE TABELLE	ccxliv
	BIBLIOGRAFIA	ccxlix

SOMMARIO

Le colate di detrito sono fenomeni naturali che in occasione di eventi pluviometrici estremi traggono origine da dissesti superficiali e si trasformano rapidamente in flussi di sedimenti misti ad acqua. Tali fenomeni comportano un notevole pericolo riconducibile all'elevata capacità erosiva e distruttiva, alla notevole mobilità, nonché al fatto che spesso essi si manifestano sotto forma di ondate successive, come effetto di processi in alveo di ostruzione e di demolizione dei depositi delle colate stesse. Negli ultimi anni anche nel territorio italiano si sono registrati diversi eventi di colate detritiche che hanno provocato numerose vittime e ingenti danni.

In tale contesto si inserisce il presente lavoro di tesi che, prendendo spunto da una situazione reale effettivamente verificatasi, si propone di contribuire a una migliore comprensione di alcuni aspetti idraulici dei fenomeni di propagazione e di arresto delle colate detritiche, effettuando indagini con approccio numerico e con approccio sperimentale.

Per l'approccio numerico sono stati adottati due differenti codici: il FLO-2D e il TRENT-2D. Il modello FLO-2D è un modello quasi bidimensionale e adotta un approccio reologico monofasico; il modello TRENT-2D è pienamente bidimensionale e assume un approccio bifase per la schematizzazione della reologia della colata. Al fine di evidenziare in modo sistematico le differenze tra i due modelli, si è fatto riferimento al caso realmente accaduto il 1° ottobre 2009 a Giampilieri. Le grandezze ottenute tramite i modelli, in particolare livelli di deposito e velocità delle colate, sono state confrontate con dati acquisiti in situ allo scopo di evidenziare le differenze di performances dei due modelli. I risultati mostrano che entrambi i modelli sono capaci di riprodurre in maniera accurata il percorso compiuto dalla colata all'interno di una zona densamente urbanizzata. Inoltre, i livelli massimi e le velocità relative alla propagazione della colata sono sovrastimate dal FLO-2D e leggermente sottostimate dal TRENT-2D, mentre i livelli di deposito osservati a fine simulazione sono sottostimati da entrambi i modelli.

Per quanto riguarda l'approccio sperimentale di laboratorio, lo studio è stato rivolto alla valutazione dell'influenza di alcuni parametri (pendenza dell'alveo, angolo di confluenza, tempistica del fenomeno) sulla dinamica della propagazione e del deposito di più colate detritiche che pervengono in un medesimo alveo torrentizio. Più precisamente, ispirandosi al caso realmente accaduto a Giampilieri, è stato progettato e realizzato un apparato sperimentale composto da tre canalette: una canaletta principale e due laterali nelle quali sono state generate due colate detritiche. Nel corso degli esperimenti l'evoluzione di due colate e dei corrispondenti depositi è stata seguita utilizzando un sistema costituito da numerosi strumenti di misura. La campagna sperimentale condotta, oltre ad una serie piuttosto ampia di prove di taratura e di messa a punto della strumentazione adottata, è consistita in venti esperimenti. I dati acquisiti dall'analisi della propagazione della colata e dall'analisi dei depositi rilevati hanno evidenziato che, all'aumentare dell'angolo di confluenza e della pendenza dei canali laterali si hanno condizioni di maggiore deposito e, dunque, di maggiore pericolosità (aumento della possibilità che si realizzino interferenze tra i depositi e conseguenti

ostruzioni). Mentre per quanto concerne la tempistica di innesco si riscontrano condizioni caratterizzate da maggiore pericolosità per innesco contemporaneo, da media pericolosità per innesco con fenomeno prima a valle e poi a monte, da minore pericolosità per innesco fenomeno prima a monte e poi a valle.

Infine, si ritiene che la ricerca svolta, avendo preso spunto da un caso realmente accaduto di colate detritiche, rappresenti un contributo metodologico e, almeno in parte, anche applicativo nel campo della mitigazione del rischio da colate detritiche.

ELENCO DEI SIMBOLI

α : angolo di confluenza
 β_B : inclinazione canaletta B
 β_A : inclinazione canale A
 β : capacità di trasporto
 δ : concentrazione lineare dei granuli
 Δ : densità relativa della fase solida
 $\dot{\gamma}$: velocità di deformazione al taglio;
 γ_s : peso specifico in condizione sature
 λ_L : scala di riduzione geometrica
 λ_K : scala di riduzione del coefficiente K.
 λ_Q : scala di riduzione delle portate
 λ_t : scala di riduzione dei tempi
 λ : scala di riduzione delle varie dimensioni geometriche
 λ_v : scala di riduzione delle velocità
 λ_v : scala di riduzione della velocità
 η : viscosità dinamica
 μ_B : viscosità di Bingham;
 μ_N : viscosità dinamica
 ϕ_S : angolo d'attrito interno in condizioni sature
 ϕ_D : angolo d'attrito interno in condizioni sature
 ϕ : coefficiente di attrito interno;
 ρ : densità del fluido;
 ρ_m : densità di massa della mistura
 ρ_s : densità di massa delle particelle di sedimento
 τ_v : particelle fluide viscosi;
 τ_c : sforzi di Coulomb;
 τ_{mc} : sforzi di taglio viscosi
 τ : sforzi di taglio;
 τ_d : sforzi dispersivi;
 τ_c : sforzo di soglia;
 τ_t : sforzi turbolenti
 τ_y : sforzo di soglia di Bingham;

- σ . sforzo di taglio
 φ . attrito interno dinamico
 φ_b . l'angolo di attrito alla base Φ . l'angolo di attrito interno
 ξ . parametro di turbolenza
 α_l . angolo medio d'impatto delle particelle
 a_i . coefficiente empirico;
 C_v . concentrazione di volume
 C_s . concentrazione massima delle particelle di sedimento in condizioni statiche
 C_v . concentrazione volumetrica
 C_{max} . massima concentrazione possibile
 c . parametro di coesione;
 C . numero di Courant
 $C.S$. coefficiente di sistemazione
 c_b . concentrazione della fase solida nel terreno
 C_v . concentrazione volumetrica
 d_{50} . diametro caratteristico della particella
 d_s . dimensione dei sedimenti;
 e_n . coefficiente di restituzione dell'energia
 l . lunghezza di mescolamento di Prandtl
 d . range dei diametri
 d_{50} . diametro caratteristico
 d_{50} . diametro mediano
 du/dy . velocità di deformazione;
 dz_b . valori degli spessori di materiale sedimentato della colata di detrito
 F . termine di attrito
 F_B . fattore di forma del singolo deposito
 f_B . fattore di forma di monte
 f_C . fattore di forma di valle
 F_C . fattore di forma del singolo deposito C
 F_M . fattore di forma dei singoli depositi per la canaletta di monte
 F_V . fattore di forma dei singoli depositi per la canaletta di valle
 h . tirante idrico o della colata
 H_{max} . quota del punto di innesco della colata;
 h_{max} . massimo livello osservato durante l'evento
 H_{min} . quota di apice del conoide;
 H_u . quota minima a cui si è fermato il conoide;
 i . variazione di volume per unità di tempo e superficie prodotta da altri fenomeni
 $I.G.$. indice geologico;
 $I.T.$. l'indice di trasporto
 j_p . l'intensità di precipitazione
 k . conducibilità idraulica
 K . fattore di torrenzialità

k l'indice di consistenza
 k_s coefficiente di scabrezza di Strikler
 L_{modello} dimensione modello
 $L_{\text{prototipo}}$ dimensione prototipo
 L distanza tra il punto di innesco e l'apice del conoide;
 L_c lunghezza del conoide;
 n indice di pseudoplasticità
 n porosità
 ρ densità del fluido
 P.M.A. precipitazione media annua;
 Q_A portata fluente
 Q_i contributo di portata
 R_m raggio idraulico r_u coefficiente di pressione interstiziale
 S_{fx} perdite di carico unitarie
 S_{fy} perdite di carico unitarie
 S_{ox} pendenze dell'alveo
 t tempo
 t_0 istante di innesco
 u_i velocità di infiltrazione
 V volume di materiale solido;
 V_{dep} volume del deposito lungo il canale A
 v_x e v_y velocità mediate sulla verticale in direzione X e y
 X_{BC} distanza calcolate rispetto l'asse intermedio e la fine del deposito allo sbocco del canale C
 X_{BV} distanza calcolate rispetto l'asse intermedio e la fine del deposito allo sbocco del canale B
 X_G coordinata del centro di massa del deposito complessivo
 X_{GB} coordinata del centro di massa del deposito allo sbocco della canaletta B
 $Y_{B\text{max}}$ estensione maggiore del deposito B lungo l'asse trasversale del canale A
 $Y_{C\text{max}}$ estensione maggiore del deposito C lungo l'asse trasversale del canale A
 Y_G coordinata del centro di massa del deposito complessivo
 Y_{GB} coordinata del centro di massa del deposito allo sbocco della canaletta B
 Z_B coordinata del centro di massa del deposito complessivo
 Z_G coordinata del centro di massa del deposito complessivo
 Z_{GB} coordinata del centro di massa del deposito allo sbocco della canaletta B

1. INTRODUZIONE

1.1 Posizione del problema

Le colate detritiche sono fenomeni che, in occasione di eventi pluviometrici estremi, traggono origine da dissesti superficiali che si innescano nella parte medio-alta dei versanti e si trasformano rapidamente in flussi di sedimenti misti ad acqua. Tali fenomeni comportano un notevole pericolo per una serie di fattori, che può individuarsi nella carenza di chiari segni premonitori, nell'alta capacità erosiva e distruttiva e, soprattutto, nell'elevata mobilità delle colate, spesso in grado di trascinare blocchi di roccia e di materiale vario di grandi dimensioni, in grado di percorrere notevoli distanze in tempi brevissimi.

Negli ultimi anni diversi eventi di colate detritiche hanno interessato il territorio italiano che, come è noto, è classificato ad elevato rischio idrogeologico. Tra gli eventi più rilevanti ricordiamo il caso di Sarno e di Quindici (1998), il caso di Giampileri, di Scaletta Zanclea e di Itala (2009), il caso di Atrani (2010) e, più recentemente, quello di Genova (2011), di Saponara (2011) e di Lipari (2012). Tali casi, peraltro, non rappresentano una eccezione. Infatti, dall'inventario dei Fenomeni Franosi in Italia redatto dall'ISPRA (IFFI; 2007), attivo a partire dal 1996, risultano censiti 485.000 fenomeni franosi che interessano un'area di 20.721 km², pari al 6,9% del territorio nazionale. La Sicilia, ad esempio, è stata classificata come undicesima regione italiana a rischio idrogeologico, con 200 comuni a rischio da frana, 23 a rischio da alluvione e 49 a rischio da frana e da alluvione.

Tali considerazioni, pertanto, portano drammaticamente in evidenza il problema di una efficace protezione e prevenzione dei centri urbani dal rischio idrologico - idraulico, ossia dal rischio di eventi calamitosi riconducibili agli effetti prodotti dall'azione dell'acqua sul territorio, quali esondazione di corsi d'acqua, colate detritiche, trasporto di materiale alluvionale, etc.

Per quanto concerne la previsione, tra gli strumenti fondamentali vi sono le mappe del rischio, spesso redatte anche grazie all'uso di modelli di propagazione di colate detritiche. Nella letteratura scientifica esistono numerosi metodi numerici basati sulla meccanica del continuo per la modellazione delle colate. Essi differiscono tra loro per le differenti relazioni reologiche implementate, per la descrizione del comportamento che caratterizza la mistura di acqua e di sedimenti di cui si compone la colata. Preme osservare che, allo stato attuale, sebbene esistano differenti modelli numerici per la modellazione della propagazione e dell'arresto di fenomeni di colata, essi presentano tuttavia una serie di difficoltà legate alla descrizione delle fasi di transizione e alla mutevole fenomenologia di comportamento esibita dai terreni in frana. A proposito di questo mutevole comportamento, Calvetti (2010) schematizza il fenomeno colata nella seguente maniera: nel corso di un evento franoso il terreno si comporta inizialmente come un solido, per poi trasformarsi in una sorta di fluido e ritornare infine a depositarsi in forma solida. Si comprende come tale comportamento sia difficile da caratterizzare tramite una unica formulazione reologica in grado di descrivere in maniera esaustiva il

comportamento della colata. Pertanto appare evidente la necessità di uno studio sistematico dei differenti modelli già esistenti in modo da valutare in base alle legge reologica adottata il loro campo di applicabilità.

Altre difficoltà nell'applicazione di modelli di propagazione di colate detritiche presenti in letteratura sono legate alla descrizione dei fenomeni di colate detritiche in condizioni di confluenza. In questi contesti i fenomeni sono influenzati da diversi fattori quali: la differenza di concentrazione (sedimento – acqua) della colata che si propaga nell'affluente e di quella che si propaga nel canale principale, la differenza di pendenza con cui si realizza la confluenza, l'angolo di confluenza; tutti parametri che necessitano di studi più particolareggiati. Infatti, tali fenomeni non possono essere descritti tramite l'applicazione di semplici modelli di propagazione che, ad esempio, schematizzano la zona alluvionale con griglie di calcolo le cui celle hanno dimensione di un metro circa. In questi casi la realizzazione di un modello fisico viene auspicata per meglio comprendere il complesso comportamento dei fenomeni di propagazione e di arresto specifici delle colate in condizioni di confluenza.

In tale contesto si inserisce il presente lavoro di tesi che si è incentrato sul comportamento di diversi codici di calcolo, nonché sullo studio della propagazione di colate provenienti da più confluenze in un medesimo corpo idrico.

1.2 Obiettivi

Con il presente lavoro ci si è posto l'obiettivo di contribuire alla comprensione di alcune delle sopracitate problematiche connesse alla propagazione e al deposito di fenomeni di colate detritiche, con particolare attenzione ai casi in condizioni di confluenze multiple.

L'obiettivo della presente tesi è stato quello di contribuire alla formulazione di metodologie per lo studio della propagazione di detti fenomeni in situazioni reali.

A tal proposito, la conoscenza delle caratteristiche morfologiche e morfometriche dell'ambiente di sviluppo delle colate di detrito, della probabilità di innesco della colata e la valutazione dell'entità volumetrica (magnitudo) della colata costituiscono le informazioni di base per poter effettuare studi circa la propagazione e l'arresto di colata. Mentre per il compimento di questi studi diventa fondamentale la definizione della legge costitutiva, legge reologica, della miscela di acqua e sedimento che compone la colata.

L'obiettivo specifico è stato pertanto quello di investigare l'applicabilità di alcuni modelli esistenti, basati su differenti leggi reologiche, a casi di studio complessi caratterizzati da piccoli bacini e da confluenze multiple. Oltre che analizzare l'influenza di alcuni parametri (quali la pendenza dell'alveo, l'angolazione della confluenza, la differenza di portata e la tempistica del fenomeno) sulla dinamica della propagazione e del deposito di più confluenze in un unico corpo idrico. Il primo obiettivo è stato perseguito tramite approccio numerico; il secondo tramite indagine sperimentale di laboratorio.

In sintesi, si ritiene che gli studi condotti sulla propagazione numerica di colate potrebbero essere efficacemente adottati per la comprensione delle potenzialità e dei limiti dei codici adottati ai fini della redazione di mappe di pericolosità, mentre le indicazioni fornite dallo studio sperimentale rappresentano un nuovo contributo alle

conoscenze necessarie per la progettazione di opere di mitigazione del rischio (e.g. canali di deflusso).

1.3 Metodologia

Lo studio delle tematiche proposte è stato affrontato seguendo un approccio sia numerico che sperimentale.

Per quanto riguarda l'approccio numerico sono stati adottati due differenti codici, rispettivamente il FLO-2D e il TRENT-2D. Il modello FLO-2D è un modello quasi bidimensionale e adotta un approccio reologico monofasico, implementato attraverso le relazioni empiriche sviluppate da O'Brien e Julien (1985); il modello TRENT-2D è pienamente bidimensionale e assume un approccio bifase per la schematizzazione della reologia della colata, basandosi sul più sofisticato metodo granulo-inerziale di Bagnold-Takahashi (1978). Inoltre, il FLO-2D è un modello a fondo fisso, mentre il TRENT-2D è capace di tener conto della variazione del fondo in maniera accoppiata alla dinamica della mistura. Al fine di evidenziare in modo sistematico le differenze tra le due metodologie, i due modelli sono stati applicati ad un complesso caso realmente accaduto di colate di detrito. Le simulazioni effettuate tramite il FLO-2D necessitano di operazioni preliminari per la taratura dei parametri reologici, svolte tramite tecniche di back analysis, mentre il TRENT-2D, implementando una legge reologica basata su parametri fisici e non empirici, non necessita di operazione preliminari di taratura.

Per quanto riguarda l'approccio sperimentale, lo studio svolto per la valutazione dell'influenza di alcuni parametri (quali la pendenza dell'alveo, l'angolazione della confluenza, la differenza di portata e la tempistica del fenomeno) sulla dinamica della propagazione e sul deposito di più colate che pervengono in un medesimo corpo idrico recettore è stato condotto presso il Laboratorio di Idraulica dell'Università di Padova. Ispirandosi al caso complesso realmente accaduto a Giampilieri, è stato progettato e realizzato un apparato sperimentale composto da tre canalette: una canaletta principale (canale A) e due laterali (canali B e C, muovendosi da monte verso valle) nelle quali sono state generate due diverse colate detritiche. Nel corso degli esperimenti l'evoluzione delle colate e dei corrispondenti depositi è stata seguita utilizzando un sistema integrato costituito da numerosi strumenti di misura. La campagna sperimentale condotta, oltre ad una serie piuttosto ampia di prove di taratura e di messa a punto della strumentazione adottata, è consistita in 19 esperimenti.

1.4 Limiti

Sia le indagini condotte con l'ausilio di codici numerici sia le indagini sperimentali effettuate in laboratorio sono soggette a diversi limiti.

Per quanto riguarda l'indagine numerica, idealmente potrebbero essere simulate condizioni molto aderenti alla realtà. Tuttavia, i limiti computazionali e le difficoltà di determinare, ad esempio, appropriate leggi reologiche in grado di descrivere il comportamento della colata durante le fasi di innesco, di propagazione e di arresto, implicano la necessità di introdurre ipotesi semplificative e alla formulazione del

problema. Inoltre la modellazione numerica condotta risulta affetta da diverse approssimazioni, in particolare riguardo:

- alla conoscenza dell'orografia dei luoghi ed in particolare delle quote all'interno del centro abitato, in assenza di rilievi topografici di dettaglio;
- alla rappresentazione del modello digitale del terreno all'interno del modello, effettuata su una griglia di 1.5x1.5 m;
- alle ipotesi alla base della modellazione, che non sono in grado di cogliere alcuni fenomeni, come l'immagazzinamento di una porzione del materiale della colata detritico fangosa all'interno degli edifici.

Per quanto riguarda le indagini sperimentali di laboratorio i limiti sono per lo più dovuti ai ben noti effetti scala che nel caso in questione, si riverberano significativamente nella rappresentatività del miscuglio.

1.5 Fasi del lavoro svolto

Il lavoro si è articolato secondo quattro fasi principali.

In primo luogo è stata condotta una fase di studio preliminare di ricerca bibliografica in cui sono state approfondite le tematiche relative alle colate di detrito, quali la caratterizzazione morfologica e morfometrica dell'ambiente di sviluppo, l'analisi delle condizioni di innesco e di entità (volume) dei fenomeni di colata e della reologia.

La parte operativa del lavoro è stata articolata in due parti: quella volta alla modellazione numerica di fenomeni realmente accaduti e quella volta alla modellazione fisica di fenomeni di colate detritiche in condizioni di propagazione e deposito in un medesimo corso d'acqua di colate provenienti da più tributari.

Per quanto concerne la modellazione numerica, sono state svolte analisi preliminari per la caratterizzazione dell'evento per ricostruire la topografia della zona pre e post evento e per stabilire la magnitudo delle colate generate, effettuando delle analisi approfondite circa la reologia delle colate che si sono verificate all'interno dell'abitato di Giampolieri in occasione dell'evento del 1° ottobre 2009. Tale attività è stata svolta anche facendo ricorso a numerosi sopralluoghi nei siti oggetto di studio. In particolare, sono state condotte operazioni di taratura di due modelli numerici, il FLO-2D ed il TRENT-2D, indagandone le performances. In particolare, i codici citati sono stati impiegati al caso studio in modo da investigare e da validare la loro applicabilità in casi caratterizzati da confluenze multiple e da bacini di piccole dimensioni.

Per quanto riguarda la modellazione fisica, è stato svolto un approfondimento della meccanica della propagazione di fenomeni di colata in condizioni di colate multiple che si depositano in un medesimo corso d'acqua. In particolare, è stata progettata e realizzata una originale installazione sperimentale presso il laboratorio di Idraulica dell'Università di Padova, con la supervisione del prof. Stefano Lanzoni. L'apparato sperimentale è costituito da un canale principale (canale A) e da due canalette secondarie, entrambe confluenti in sinistra idraulica (canali B e C muovendosi da monte verso valle). Le canalette laterali, entrambe a pendenza variabile, presentano la stessa geometria. L'attività di messa a punto della strumentazione ha previsto operazioni di calibrazione della strumentazione di misura e del sistema di sincronizzazione e di acquisizione dei dati. Inoltre, con l'obiettivo di simulare sperimentalmente colate

deitriche mature, è stata effettuata una campagna di misura preliminare finalizzata all'ottimizzazione della pendenza del canale in funzione delle caratteristiche sedimentologiche del materiale utilizzato. Gli esperimenti effettuati sono stati volti ad analizzare i fenomeni di deposito generati dalle colate deitriche che, confluendo in un'asta principale a breve distanza l'una dall'altra, interagiscono tra loro. In particolare, si è analizzata l'influenza che alcuni parametri (i.e., l'angolo di confluenza e lo sfasamento degli istanti di innesco delle colate deitriche) esercitano sull'evoluzione e sull'arresto dei depositi che si realizzano nel corso d'acqua principale. In definitiva il lavoro si è articolato come sinteticamente rappresentato nella Figura 1.1.

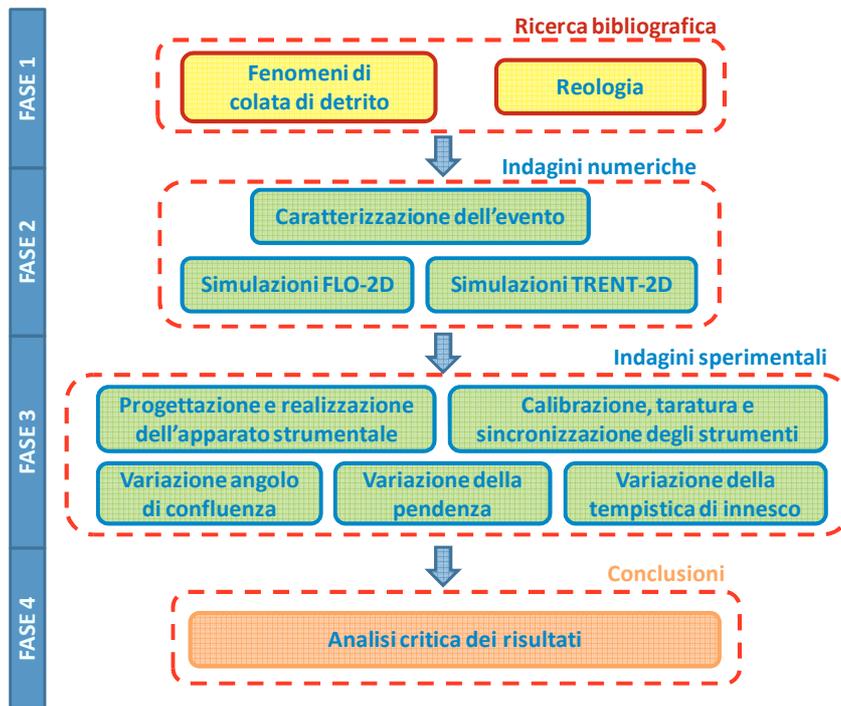


Figura 1.1 Fasi del lavoro svolto.

Sulla base di queste fasi il presente elaborato risulta articolato come segue. Il Capitolo 2 introduce la tematica delle colate deitriche; nel Capitolo 3 vengono affrontati i problemi connessi alla formulazione matematica del comportamento della colata deitrica, effettuando analisi di dettaglio sulla reologia. Il successivo Capitolo 4 presenta l'attività di modellazione numerica svolta. Nel Capitolo 5 viene descritta la fase di progettazione e di realizzazione dell'apparato strumentale e del sistema di misura. Nel Capitolo 6 viene presentata la campagna sperimentale condotta e le evidenze sperimentali ottenute. Successivamente nel Capitolo 7 sono riportate le analisi effettuate sulle evidenze sperimentali e infine il Capitolo 8 riporta le principali conclusioni del lavoro svolto.

2. FENOMENI DI COLATA DETRITICA

2.1 Generalità

Le colate di detrito chiamate *debris flow* nella letteratura anglosassone, sono fenomeni naturali di flussi iper-concentrati, la cui concentrazione di materiale trasportato è tale da influenzare in maniera significativa le caratteristiche idrodinamiche della matrice fluida. In particolare, consistono in un movimento di massa di miscele di acqua e di particelle solide caratterizzate da una elevata densità e da un regime diverso da quello delle correnti d'acqua. Tali fenomeni comportano un notevole pericolo per una serie di fattori, che possono individuarsi nella carenza di chiari segni premonitori, nell'alta capacità erosiva e distruttiva e, soprattutto, nell'alta mobilità delle colate, spesso in grado di trascinare blocchi di roccia e materiale vario di grandi dimensioni, percorrendo notevoli distanze in tempi brevissimi. Grazie ai continui scambi energetici tra le particelle solide ed all'effetto fluidificante della fase liquida della miscela queste colate sono in grado di muoversi con velocità che arrivano fino a 20 m/s. I notevoli volumi generalmente coinvolti (magnitudo della colata) sono caratterizzati da energie di impatto elevatissime con effetti devastanti al suolo in quanto sono in grado di abbattere edifici ed infrastrutture e di sommergere intere zone di territorio.

Le colate di detrito possono essere classificate in funzione dei differenti parametri caratteristici della colata, oltre che in funzione delle proprietà fisiche e del comportamento meccanico. I primi sono per lo più basati sui seguenti parametri:

- la concentrazione e la distribuzione spaziale dei solidi all'interno della corrente (immature o mature debris flow);
- la composizione granulometrica del sedimento (stony debris flow o mud-earth flow);
- la densità della miscela liquido-solida e la pendenza dell'alveo (Ghilardi et al., 1999).

Ulteriori classificazioni sono quelle effettuate in funzione delle proprietà fisiche legate alla propagazione delle colate, come la dissipazione dell'energia. Quest'ultima nel caso specifico della propagazione della colata può avvenire o grazie alle tensioni tangenziali fra le particelle del fluido o per le tensioni tangenziali fra fluido e contorno. Queste tensioni possono essere di origine:

- turbolenta: collegate alla velocità di agitazione turbolenta che inducono trasferimenti di quantità di moto tra strati fluidi a diversa velocità media di trasporto;
- viscosa: collegate, in funzione del coefficiente di viscosità, alle velocità angolari di deformazione delle particelle fluide.

Infine una classificazione molto nota basata sul comportamento meccanico della massa è quella effettuata da Ancey (2001), che suddivide questa tipologia di fenomeni naturali in tre diverse categorie:

- muddy debris flow: quando si tratta di materiale con ampia classe granulometrica, con buona percentuale di materiali argillosi, tanto da conferire un comportamento coesivo alla massa e da lubrificare il contatto fra particelle grossolane. Il comportamento è viscoplastico: il livello di tensione è basso; il materiale si comporta come corpo solido, ma quando la tensione supera la tensione di snervamento, fluisce come un fluido;
- granular debris flow: la distribuzione granulometrica è ampia, c'è poco materiale fine. Il comportamento della massa è atteso essere di tipo attrito-collisionale poiché dominato da collisioni e attriti fra particelle grossolane. La dissipazione di energia è maggiore rispetto al muddy debris flow, quindi sono necessarie pendenze maggiori del 15% (cioè circa 8.5°) per avere la fluitazione. I depositi sono facilmente riconoscibili per la disposizione caotica del materiale grossolano in superficie e per la gradazione orizzontale del materiale dovuta al drenaggio a valle del materiale più fine;
- lahar debris flow: la distribuzione granulometrica è piuttosto ristretta e la porzione di materiale argilloso è limitata. Si sviluppano in aree vulcaniche dove i suoli sono formati da cenere, ma anche dove i suoli sono gessosi o loess (sedimento eolico caratterizzato dalle piccole dimensioni). Il comportamento della massa è atteso essere frizionale/viscoso; lo stress di snervamento è basso e quindi questi fenomeni possono fluire su superfici anche in leggera pendenza (1% cioè circa 0.6°).

La normale evoluzione di un debris flow consiste in diverse fasi (Figura 2.1):

- innesco, avviene nella parte alta del bacino detta anche zona di alimentazione o testata;
- trasporto lungo l'alveo del torrente, canale collettore o adduttore in erosione al fondo e con la genesi di nuove aree contribuenti lungo le sponde e la deposizione di argini laterali;
- arresto, che solitamente avviene in conoide, che caratterizza la parte apicale dell'area di deposito dei detriti prodotti dal bacino.



Figura 2.1

Rappresentazione schematica delle differenti parti che compongono la colata detritica.

2.2 Caratteristiche morfologiche e morfometriche dell'ambiente di sviluppo delle colate detritiche

La colata detritica si sviluppa secondo una precisa morfologia. In particolare, le zone del territorio maggiormente coinvolte dallo sviluppo di colate sono due: l'area di alimentazione (bacino imbrifero) e l'area di accumulo (cono di deiezione), collegate tra loro dal canale di flusso (vedere Figura 2.2).

L'area di alimentazione si trova nella zona sommitale; essa è caratterizzata da forti pendenze ed è la zona in cui ha innescato il fenomeno della colata. L'innescato della colata avviene generalmente a causa di un evento meteorico in cui l'acqua scorrendo in superficie erode e trasporta il detrito, convogliando la miscela detritica verso una zona di deposizione. Nell'area di alimentazione, generalmente predisposta alla formazione di questi eventi per fattori antropici e/o naturali, la perdita di detrito causa un abbassamento del terreno, con la formazione sovente di pareti ripide tra la zona di distacco e le aree circostanti non interessate dal fenomeno. Le zone sorgente più frequenti sono rappresentate da concavità topografiche o depressioni nella parte alta dei bacini imbriferi montani, caratterizzate da elevate pendenze e scarsa copertura vegetale.

Il sedimento asportato fluisce verso valle tramite un canale collettore o di alimentazione, andando ad abbattere ed asportare la vegetazione presente ai suoi bordi. In questo tratto i fenomeni di trasporto e di erosione sono bilanciati. Il canale collettore si presenta generalmente più stretto che nelle aree a monte e a valle e avrà una pendenza minore rispetto all'area di formazione. Il canale coincide in genere con un'asta torrentizia già presente, anche a carattere intermittente, o con lungo un pendio in cui va a creare argini con l'avanzare del processo, presentando una sezione ad "U", sovente dotata di cordoni laterali.

La colata termina il suo percorso nell'area di deposito, in cui la pendenza relativamente bassa consente al detrito di fermarsi e depositarsi, formando un conoide (o cono di deiezione). Quando il conoide è soggetto a fenomeni gravitativi, quindi è possibile definirlo un cono attivo. Esso viene schematicamente suddiviso in tre zone:

- zona prossimale, formata da argini laterali provenienti dall'inizio della colata, caratterizzati da pendenze tra i 6° e i 10° e granulometria grossolana;
- zona mediale, posta più a valle e con pendenze che calano fino ai $2 - 3^\circ$
- zona distale, posta nel punto ad altimetria più bassa avente una ridotta pendenza.

La propagazione della colata avviene sotto forma di lingua lobata con fronte e lati composti da materiale a grande granulometria ed una coda composta da una maggiore fase liquida. L'avanzamento può avvenire anche suddiviso in più ondate successive caratterizzate da elevate velocità.

Le grandezze significative di una colata detritica, utili ai fini delle indagini di tali fenomeni, sono identificabili nei seguenti punti:

- H_{max} : quota del punto di innescato della colata;
- H_{min} : quota di apice del conoide;
- H_u : quota minima a cui si è fermato il conoide;
- dislivello tra H_{max} e H_{min} ;
- dislivello totale, dato da $H_{max} - H_u$;

- L : distanza tra il punto di innesco e l'apice del conoide;
- L_c : lunghezza del conoide;
- L_{tot} : $L + L_c$;
- inclinazione della nicchia di distacco;
- inclinazione del canale collettore: $(H_{max} - H_{min})/L$;
- inclinazione del conoide: $(H_{max} - H_{min})/L_c$;
- larghezza di area di distacco, asta torrentizia ed area di deposito;
- volume dei sedimenti mobilitati;

Le unità di misura adottate per i parametri precedente descritti si riferiscono al sistema internazionale, quindi lunghezze in metri e volumi in metri cubi.

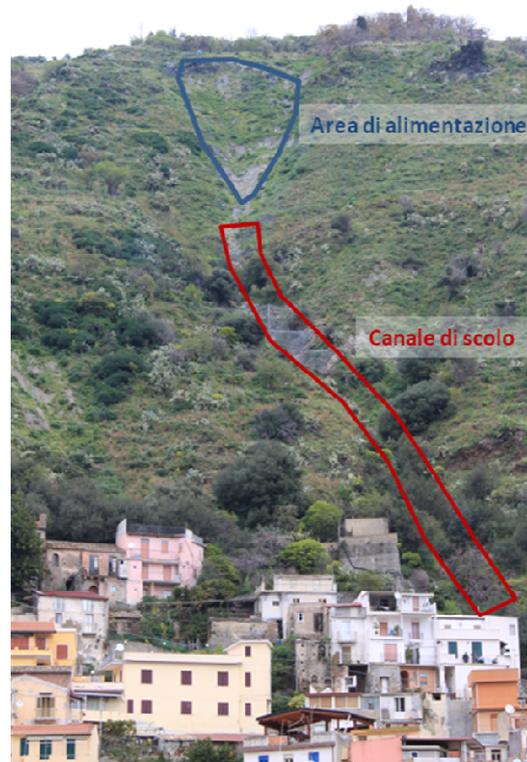


Figura 2.2

Rappresentazione schematica delle differenti parti che compongono la colata detritica con riferimento al caso di un pendio del Messinese dal quale si sono innescate diverse colate durante l'evento del 1 ottobre 2009.

2.3 Condizioni di innesco delle colate detritiche

La previsione dell'innesco della colata detritica è un'operazione estremamente complessa, in quanto tale fenomeno dipende da numerose variabili interagenti tra loro, quali parametri morfologici di uso del suolo, parametri idrologici e idraulici, temperatura e umidità dell'aria oltre che le caratteristiche litologiche e geotecniche del suolo e del substrato roccioso del terreno dal quale vengono generate.

Per tutte le ragioni prima accennate lo studio delle modalità di innesco delle colate dovrebbe partire da un approccio multidisciplinare fondato sia su basi geotecniche (analisi di stabilità) che su basi idrologiche - idrauliche (definizione delle soglie di innesco). La previsione dell'innesco basata su basi geotecniche fa riferimento a modelli di stabilità, come quello del pendio indefinito sotto diverse condizioni di livello di falda. All'interno del presente paragrafo verranno maggiormente trattati i modelli basati su analisi di approccio idrologico - idraulico.

A tal proposito, per quanto concerne lo studio della probabilità di innesco di fenomeni di colata basati su approccio di tipo idrologico-idraulico, esse possono essere suddivise in modelli basati sulla fisica del fenomeno (fisicamente basati o concettuali) o di tipo empirico (statistici, analisi storiche).

I modelli fisicamente basati sono volti a determinare il quantitativo di precipitazione in grado di generare un evento di colata, oltre che a stabilire nel dettaglio la collocazione spaziale e temporale dell'evento. Essi sono quindi degli strumenti utili per i sistemi di preallarme, sebbene presentino forti limitazioni, in quanto necessitano di informazioni dettagliate nello spazio circa l'idrologia, la litologia, la morfologia. Tali informazioni non sono di facile reperibilità, soprattutto per aree di grande estensione, e inoltre risultano costose se acquisite tramite indagine in situ.

Infine, i modelli fisicamente basati si adattano maggiormente ad analisi per la predizione dell'innesco di colate superficiali rispetto a quelle profonde. Essi, infatti, tengono in considerazione non solo i dati di pioggia ma anche informazioni relative alla stabilità del pendio, per far ciò si servono delle equazioni di infiltrazione (ad esempio Green Ampt, 1911; Philip, 1954; Salvucci e Entekabi, 1994). In letteratura si rilevano numerosi modelli. Tra essi si ritiene opportuno segnalare i modelli sviluppati da Wilson (1989), Wilson e Wieczorek (1995), Crosta e Frattini (2003), Montgomery e Dietrich, 1994, Iverson (2000), per la loro maggiore diffusione.

Altri modelli basati sulla fisica del fenomeno sono quelli di tipo concettuale, che determinano la probabilità di innesco in base allo stato del contenuto d'acqua del suolo antecedente l'innesco. Sono modelli che effettuano un bilancio del contenuto d'acqua del terreno considerando le piogge verificatesi prima dell'evento e tenendo conto anche di un fattore di drenaggio del suolo. Questi modelli sono stati investigati da Crozier e Eyles (1980), Crozier (1999) e Glade et al. (2000). L'applicazione di questa tipologia di modello ha mostrato risultati interessanti sul piano applicativo, anche se al momento non si rilevano casi di implementazione all'interno di sistemi di preannuncio di eventi di colata.

Per quanto concerne i modelli empirici è possibile trovare modelli basati su diverse variabili anche differenti tra loro, a tal proposito Guzzetti et al. (2007) hanno individuato tra i modelli in letteratura più di 25 parametri tra quelli di pioggia e quelli climatici su cui tali modelli si basano.

Essi possono essere suddivisi in base al raggio d'azione a cui possono essere applicati in:

- modelli globali: i quali stabiliscono le condizioni minime al di sotto delle quali eventi di colata hanno poca o nulla probabilità di verificarsi, indipendentemente dalle formazioni morfologiche del sito, dalle piogge pregresse e dall'uso del suolo e della litologia.
- modelli regionali: possono avere un raggio d'azione che varia da pochi chilometri quadrati ai migliaia di chilometri quadrati; essi sono basati su condizioni di similarità di condizioni climatiche, meteorologiche e similarità delle caratteristiche fisiche del terreno.
- modelli locali: hanno un raggio di azione di pochi o un centinaio di chilometri quadrati e si riferiscono ad aree dove insistono uno o più colate caratterizzate da gli stessi fattori climatici e dalla stessa litografia e morfologia dei territori.

Un'ulteriore classificazione di tali modelli può essere effettuata considerando le varie misure di precipitazione sulle quali essi si basano. Vengono così individuati due gruppi principali:

- soglie che si basano sulle misure di precipitazione relative ad un singolo evento;
- soglie che considerano anche le condizioni di precipitazione antecedenti all'evento

In particolare, le soglie che si basano su i dati di pioggia relativi al singolo evento possono essere suddivise a loro volta in base ai seguenti parametri: a) soglie intensità-durata; b) soglie basate sui dati di precipitazione complessiva dell'evento; c) soglie di precipitazione dell'evento-durata; d) soglie di precipitazione – intensità. Le soglie più comunemente adottate per la previsione dell'innescò di frane superficiali e di debris flow sono quelle che si basano sulla relazione intensità – durata (Caine 1980, Cancelli e Nova 1985, Cannon e Ellen 1985, Wieczorek 1987, Ceriani et al. 1994, Crosta e Frattini 2001).

Le soglie che considerano le condizioni antecedenti l'evento si basano sui dati relativi allo stato di umidità del terreno considerando questo parametro nella sua variabilità spazio temporale. Ottenere dati precisi su tale variabilità è molto difficile in quanto l'umidità del terreno dipende da molteplici fattori: le precipitazioni, la temperatura e la storia degli eventi pregressi. La valutazione delle precipitazioni fatta su un arco temporale precedente all'evento di colata è l'approccio più semplice da applicare per l'individuazione di soglie che considerano le condizioni antecedenti. Il fattore chiave a questo punto diventa quello di stabilire la durata dell'arco temporale da tenere in considerazione; questa scelta va effettuata considerando fattori come la diversa litologia, la copertura vegetale e le condizioni del suolo oltre che le differenze dei regimi climatici e meteorologici. Si cita tra le soglie che considerano la pioggia cumulata durante l'intero evento meteorologico che ha originato il fenomeno di frana quella sviluppata da Chleborad A.F. (2003), mentre tra quelle che mettono in relazione la pioggia cumulata su un periodo antecedente l'evento con la pioggia del giorno di innescò della frana si cita quella di Lumb (1975).

Per maggiori dettagli sulle formulazioni sopra sinteticamente richiamate si rimanda al lavoro di Guzzetti et al. (2007).

2.4 Valutazione della possibilità di mobilitazione di materiale dai bacini e stima dei volumi mobilitabili dai bacini

La valutazione della magnitudo della colata e della probabilità che un evento del genere si verifichi è un problema di non facile previsione, data la complessità del fenomeno e la scarsa disponibilità di dati utili a validare le metodologie disponibili. A riguardo si ricordano i numerosi fattori geologici, idraulici e pluviometrici connessi alle fasi d'innescò, di propagazione e di deposito di una colata detritica; fasi che sono, altresì, caratterizzate da una variabilità sia spaziale che temporale che ne rende difficile la determinazione (Takahashi, 1991).

In letteratura è possibile individuare differenti metodi per la valutazione della possibilità che nel bacino si realizzano effettivamente fenomeni di colata di detrito. Uno dei metodi più noti è quello proposto da Melton (1965).

In particolare, la valutazione della predisposizione del bacino idrografico alla formazione di colate detritiche secondo Melton si basa sulle caratteristiche morfometriche dei bacini:

$$Me = (H_{\max} - H_{\min}) A^{-0.5}$$

in cui H_{\max} e H_{\min} sono rispettivamente le quote massima e minima del bacino e A è la superficie del bacino stesso. Valori dell'indice di Melton superiori a 0.5 indicano propensione allo sviluppo di debris flow da parte del versante oggetto di studio.

Mentre per quanto concerne la stima dei volumi mobilitabili, nella letteratura scientifica si riscontrano metodologie per lo più che fanno riferimento invece ad approcci di tipo speditivo, che forniscono relazioni di tipo empirico; che legano le caratteristiche del bacino al volume di materiale solido movimentabile dal versante.

Come prima anticipato, in letteratura scientifica sono presenti numerose metodologie speditive per la stima del materiale mobilitabile per fenomeni di colate detritiche, ma quelle adottate nel proseguo fanno riferimento a quanto suggerito da Foti (2010) per i bacini del messinese. Esse vengono di seguito riportate:

La formula di Bianco e Franzi (2000) permette di ricavare il valore massimo di volume di materiale solido V di una colata in funzione dell'indice geologico I.G., che esprime l'erodibilità e le caratteristiche litologiche della rete idrografica, dell'area del bacino A e della pendenza media dell'asta i :

$$(V/A)_{\max} = 14000 * I.G.^{(1+0.1I.G.)} * i^{(1.5-i)} + 13000 * A^{-0.4}$$

questa relazione è valida per bacini aventi le seguenti caratteristiche: $0.11 < A < 44.45$ km²; $0.115 < i < 0.71$; $0 < I.G. < 5$; $800 \text{ mm} < P.M.A. < 2100 \text{ mm}$ (P.M.A.=precipitazione media annua).

La formula di D'Agostino, Cerato e Coali (1996) definisce i volumi mobilitabili in un bacino idrografico in base ai dati relativi a corsi d'acqua del Trentino caratterizzati da una superficie inferiore a 45 km² e una pendenza media dell'alveo compresa tra 11.5% e 71%:

$$V_1 = 39 * A * (i * 100)^{1.5} * (I.G.) * (I.T.)^{-0.3}$$

$$V_2 = 36 * A * (i * 100)^{1.5} * (I.G.) * (1 + C.S.)^{-0.3}$$

in cui I.T. è l'indice di trasporto basato sulla classificazione di Aulitzky del bacino (che assume i valori di 1 nel caso dei debris flow, 2 in caso di debris flood e 3 in caso di

trasporto di fondo) e C.S. è il coefficiente di sistemazione (pari a 1 nel caso in cui gli interventi nel bacino siano ideali a decrescere fino a 0 con il diminuire dell'efficacia degli stessi).

La relazione di Bottino et al. (1996), valida solo per bacini montani con una superficie non superiore ai 0.4 km², è stata ottenuta mediante l'interpolazione di 6 valori di volumi di colata detritica misurati in occasione di eventi verificatisi nella zona di Ivrea nel 1993:

$$V = 21241 * A^{0.28}$$

La formula di Kronfellner-Kraus (1984) stima i volumi mobilitabili mediante un'espressione che li lega al cosiddetto fattore di torrenzialità "k", che esprime il complesso dei processi del ciclo erosivo operanti nel bacino, alla superficie del bacino ed alla pendenza media dell'asta torrentizia:

$$V = k * A * i * 100$$

dove k è il fattore di torrenzialità e può assumere un valore intorno a 1500 per piccoli bacini caratterizzati da una discreta pendenza, mentre nel caso di bacini relativamente ampi si assume un valore pari a 500. Questo metodo è appropriato soprattutto per alvei relativamente stretti e a pendenza sufficientemente elevata, ossia in grado di mantenere una certa capacità di trasporto.

La formula di Marchi e Tecca (1996), applicabile per tutti quei bacini con 0.1 < A < 20 km², lega semplicemente i volumi mobilitabili all'area del bacino idrografico, in base allo studio di colate detritiche verificatesi sulle Alpi Orientali:

$$V = 70000 * A.$$

3. MODELLI REOLOGICI

3.1 Generalità

Alla reologia è possibile attribuire una data di nascita; essa, infatti, viene fatta coincidere con il 29 aprile del 1929, giorno in cui un gruppo di illustri scienziati fondò a Columbus, in Ohio, la Società di Reologia. Il termine, la cui etimologia va ricondotta alla lingua greca, indica lo studio del flusso e della deformazione dei corpi. Per una migliore comprensione di questa scienza è utile conoscere la base sperimentale e concettuale su cui essa è basata.

La reologia classica di Reiner (1960) trae origine dalla descrizione di un esperimento attraverso il quale Reiner notò che una matita, una sfera di plastica ed un volume d'acqua lanciati dalla stessa altezza su un tavolo, dopo l'impatto si comportavano in maniera differente. In seguito a questo esperimento, Reiner affermò: "La meccanica non può dare alcuna risposta a queste differenti tipologie di comportamento ed è proprio qui che interviene la reologia".

Secondo la reologia tutti i corpi reali possiedono proprietà intermedie tra due comportamenti ideali estremi: da una parte quello del solido perfettamente elastico e dall'altra quello del fluido perfettamente viscoso; comportamenti che fanno riferimento a due ben note leggi quali la legge di Newton e la legge dell'elasticità di Hooke. Tali leggi si rivelano particolarmente utili al fine di riassumere gli effetti macroscopici di piccola scala dei processi meccanici che operano contemporaneamente in ogni infinitesimo di volume della materia, che nel caso di colate di detrito viene modellato matematicamente come un continuo.

La meccanica dei fluidi newtoniani, così come la teoria classica dei corpi elastici, non è considerata parte del campo di studio specifico della reologia, che si occupa invece del comportamento dei corpi viscoelastici, le cui caratteristiche sono intermedie rispetto ai due ideali estremi, che contengono caratteristiche elastiche e viscosi.

A tal proposito Iverson nel suo scritto "Il mito della reologia" sottopone alla comunità scientifica un cruciale quesito e cioè: "esiste una formula reologica in grado di rappresentare globalmente il comportamento meccanico di una colata di detrito nel tempo e nello spazio in relazione ad ogni infinitesimo di volume che la costituisce?". La risposta è apparentemente negativa poiché gli effetti dei processi meccanici di piccola scala variano enormemente nel tempo e nello spazio all'interno di processi quali le colate di detrito: la causa di questa variazione è attribuibile all'interazione tra solidi e fluidi. In particolare, durante le sperimentazioni di laboratorio da lui condotte, Iverson osservò che i diversi infinitesimi di volume che costituiscono la colata di detrito presentano differenti comportamenti reologici e che lo stesso infinitesimo di volume una reologia varia con lo scorrere del tempo.

Con l'aumentare del contenuto di acqua, lo stato del terreno può cambiare da elastico, elastico-plastico, elastico-plastico-viscoso, plastico-viscoso ad un corpo viscoso (Komamura & Huang, 1974).

I differenti modelli come il modello viscoso-Coulomb, il modello di Bingham (Johnson, 1970), il modello viscoplastico generalizzato (Chen, 1988), il modello dilatante (Bagnold, 1954, Takahashi, 1981), il modello reologico quadratico (O'Brien e Julien, 1984) differiscono per il grado di complessità e possono non essere universalmente applicabili.

I risultati sperimentali hanno evidenziato che a basse concentrazioni i miscugli costruiti da materiale fine (limo e argilla) mostrano un comportamento newtoniano, mentre ad elevate concentrazioni hanno un comportamento meglio rappresentato dai modelli viscoplastici di Bingham, Herschel-Bulkley, bilineari (Locat, 1997), quadratici (O'Brien et al., 1993).

Bertolo et al. (2008), dopo aver analizzato alcune colate di detrito avvenute sulle Alpi italiane, hanno provato a ricrearle utilizzando diversi modelli numerici che implementano al loro interno differenti equazioni costitutive della colata (alla Bingham, equazione Voellmy e il modello reologico quadratico): i risultati hanno dimostrato che nessuno tra questi modelli è in grado di riprodurre una rappresentazione appropriate a tutti i casi osservati.

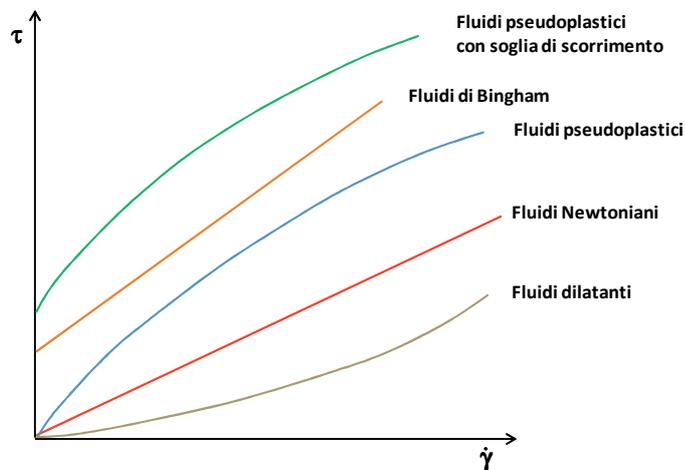


Figura 3.1 Reogramma dei diversi tipi di fluido, raffigurante l'andamento delle sollecitazioni di taglio in funzione della velocità di deformazione per diversi tipi di fluido.

In tale contesto appare opportuno ricordare che i fluidi possono essere classificati in funzione della viscosità che li caratterizza in (Figura 3.1):

- fluidi newtoniani, la cui viscosità è costante indipendentemente dalla temperatura e dai valori di pressione. Un fluido di tale genere è rappresentato da una retta passante dall'origine: a una sollecitazione nulla corrisponde un valore nullo di velocità.
- fluidi alla Bingham, la cui viscosità è costante, ma che hanno bisogno di una sollecitazione minima per poter cominciare a scorrere: questi sono

rappresentati da una retta che non passa dall'origine e che intercetta l'asse y in corrispondenza del valore s_0 , detto soglia di scorrimento.

- fluidi non newtoniani, la cui viscosità è connessa ad alcune caratteristiche quantitative che cambiano in funzione degli sforzi di taglio (o del quadrato della velocità). In quest'ultima ipotesi identifichiamo le seguenti classi:
- fluidi pseudoplastici, la cui viscosità diminuisce al crescere dell'intensità dello sforzo;
- fluidi dilatanti, la cui viscosità aumenta al crescere dell'intensità dello sforzo.

Partendo da tale classificazione, si può descrivere il comportamento di una colata detritica mediante differenti modelli reologici; i principali rintracciabili in letteratura e di maggior interesse sono i seguenti:

- modello Newtoniano;
- modello di Bingham;
- modello reologico quadratico (O'Brien & Julien);
- modello di Herschel-Bulkley;
- modello dilatante, o modello granulo-inerziale (Bagnold- Takahaski);
- modello di Voellmy.

Essi verranno descritti all'interno del presente capitolo descrivendo non solo i principi secondo i quali tali modelli sono stati formulati ma anche il loro campo di applicabilità.

In particolare preme osservare che il modello reologico quadratico e il modello dilatante sono i modelli reologici adottati dai codici di calcolo applicati al capitolo 4 per la simulazione del caso reale di colate detrito avvenuto a Giampileri durante la notte del 1° ottobre 2009. Tali modelli sono tra quelli presenti in letteratura quelli maggiormente utilizzati per la schematizzazione del comportamento della colata rispettivamente ad un sistema monofase e ad un sistema multifase.

3.2 Il modello Newtoniano

Il modello newtoniano trae origine dalla relazione di proporzionalità (definita da Isaac Newton nel 1687) tra σ , detto sforzo di taglio, e il gradiente della velocità $\dot{\gamma}$ detto anche velocità di deformazione al taglio.

L'equazione che caratterizza i fluidi newtoniani è la seguente:

$$\sigma = \eta \dot{\gamma}$$

dove la costante di proporzionalità η è solitamente detta viscosità, termine al quale viene aggiunto l'aggettivo 'dinamica' per distinguerlo dalla viscosità cinematica che è invece definita dal rapporto η/ρ tra la viscosità dinamica η e la densità del fluido ρ .

Nell'ambito dell'applicazione del modello newtoniano a fenomeni quali le colate di detrito, è stato osservato che l'acqua presente all'interno della miscela solido-liquida si comporta allo stesso modo di un fluido newtoniano solo fino a quando la quantità di sedimento presente non sia superiore al 9% in volume. Concentrazioni più elevate altererebbero le caratteristiche del fluido a causa delle collisioni fra particelle, ed inoltre

la viscosità dinamica (μ_N) non sarebbe più costante, ma varierebbe in relazione alla velocità di deformazione (du/dy). Inoltre, per elevate concentrazioni di sedimento è necessario che sia superata la resistenza al taglio prima che abbia luogo una qualsiasi deformazione.

Benché il modello laminare newtoniano apporti degli indubbi vantaggi legati alla propria semplicità, esso presenta anche alcuni limiti, poiché non riesce a descrivere i fenomeni di formazione di argini e di lobi su pendenze relativamente elevate (superiori a 10°; 18%), né la presenza del *plug* rigido che si osserva spesso in un debris flow, né, infine, la gradazione inversa talvolta mostrata dai depositi.

3.3 Modello di Bingham

I primi studiosi a dedicarsi alla comprensione fisica delle colate di detrito furono Johnson (1965) e Yano e Daido (1965), i quali riscontrarono che le colate di detrito presentavano proprietà caratteristiche tanto dei fluidi viscosi quanto di quelli plastici. Fu Johnson ad adottare un modello semplificativo capace di simulare le caratteristiche di entrambi i fluidi. Tale intuizione rappresentò un importante passo in avanti sul tema, poiché fino a quel momento la comunità scientifica non aveva mai effettuato alcuna distinzione tra i processi fisici-meccanici che governano le colate di detrito e quelli che invece governano il trasporto solido ordinario.

Molti ricercatori hanno condotto studi di laboratorio finalizzati alla verifica dell'adattabilità dei modelli "alla Bingham" alla descrizione del fenomeno di propagazione di flussi iperconcentrati. A tal proposito O'Brien et al. (1988) cita i lavori di Cao et al. (1983), Hou e Yang (1983), Higgins et al. (1983), Street (1958), Thomas (1963), Qian et al. (1980), Govier e Aziz (1982), Dai et al. (1980), successivamente portato avanti anche da Major e Pierson (1992).

Il modello alla Bingham è il più semplice modello meccanico adottato allo scopo di simulare i processi di colata di detrito. Questo modello, mediante un'equazione costitutiva, descrive il fenomeno di una colata monofasica che si comporta alla stregua di un corpo rigido o elastico, fin quando gli sforzi deviatorici non superino un determinato valore di soglia, rappresentato dallo sforzo di soglia plastico.

I modelli mettono in relazione gli sforzi di taglio τ ed il gradiente della velocità $\dot{\gamma}$ attraverso la seguente equazione:

$$\tau = \tau_y + \mu_B \dot{\gamma}$$

nella quale τ_y è detta sforzo di soglia di Bingham e μ_B viscosità di Bingham. I valori di τ_y e μ_B dipendono principalmente dalla concentrazione dei sedimenti, dalla dimensione degli stessi e dalla curva granulometrica che li contraddistingue.

Diversi ricercatori hanno individuato che i parametri τ_y e μ_B sono dipendenti dalla concentrazione dei sedimenti della colata detritica fangosa (O'Brien e Julien, 1988; Major e Pierson 1992). I risultati dei loro studi evidenziano come τ_y e μ_B aumentino esponenzialmente al crescere della concentrazione e dunque le loro relazioni possono essere espresse come segue:

$$\tau_y = a_1 e^{b_1 C_v}$$

$$\mu_B = a_2 e^{b_2 C_v}$$

dove i coefficienti a_1 e a_2 e gli esponenti b_1 e b_2 sono valori positivi tutti dipendenti dalle dimensioni dei sedimenti, dalla granulometria e dalla distribuzione dei materiali che lo compongono. Appare opportuno evidenziare che tali equazioni non riescono a descrivere in maniera adeguata il comportamento reologico della colata quando essa è caratterizzata da materiale di grossa pezzatura. Inoltre nella letteratura scientifica esistono poche indicazioni in merito ai valori attribuibili a τ_y e μ_B , i quali possono variare all'interno di grandi range (Bertolo et al., 2008).

I limiti principali attribuibili ai modelli alla Bingham risiedono nell'ipotesi che la quantità di moto del trasporto solido e la dissipazione di energia nelle colate di detrito avvengano esclusivamente attraverso gli sforzi viscosi, non tenendo conto del fatto che la dissipazione d'energia possa avvenire anche attraverso la collisione tra i diversi grani di sedimento e/o tra essi e le pareti al contorno.

Molto interessante a tal proposito è il contributo apportato da Iverson (1997) che descrive proprio i modelli alla Bingham richiamando quanto enunciato da Johnson in merito al parallelismo tra la formula reologica alla Bingham e l'equazione di Coulomb. Come fu intuito da Johnson, è possibile generalizzare i modelli alla Bingham, al fine di far sì che lo sforzo di snervamento dipenda dal coefficiente d'attrito di Coulomb (e quindi dalle sollecitazioni medie) e che la viscosità sia dipendente dal gradiente di deformazione (Iverson, 1985; Coussot e Piau, 1994,1995).

L'applicazione dei modelli alla Bingham alle colate di detrito ha però assunto quasi sempre parametri di viscosità e di sforzo di snervamento invariabili (Fink et al., 1981). In particolare, il modello reologico di Bingham è stato spesso applicato considerando condizioni di moto permanente e uniforme. In tali condizioni è possibile risalire ai valori del fattore di sforzo di snervamento analizzando il bilancio tra le forze di propagazione e le forze d'attrito, in relazione allo spessore dei depositi ai lobi delle colate di detrito. (Johnson, 1984; Whipple e Dunne, 1992).

Gli sforzi alla Bingham τ trattati in questa maniera sono equivalenti sia concettualmente che matematicamente agli sforzi di Coulomb τ_c espressi dalla relazione:

$$|\tau_c| = (\sigma - p) \tan \phi + c$$

dove $(\sigma - p)$ sono gli sforzi normali effettivi, ϕ è il coefficiente di attrito interno e c è il parametro di coesione. In particolare, nel caso in questione il coefficiente di attrito interno ϕ è nullo e la condizione di snervamento è controllata esclusivamente dalla coesione. Se il parallelismo tra gli sforzi alla Bingham e gli sforzi alla Coulomb fosse fondato su basi fisiche, al crescere delle percentuali di sedimenti fini all'interno della colata, si osserverebbe un aumento degli sforzi alla Bingham. Esperimenti condotti a tal proposito su piccola scala con misture di colate detritiche, composte da sedimenti fini e acqua, riescono a dimostrare tale parallelismo (Johnson, 1970; O'Brien e Julien, 1988; Major e Pierson, 1992). Al contrario, esperimenti condotti su larga scala e con misture composte prevalentemente da sabbia, materiale grossolano e acqua, caratterizzate da percentuali ridotte di fini, dimostrano che all'aumentare del contenuto di materiale fine, lo spessore dei lobi e gli sforzi apparenti decrescono, perché la porzione di sedimento fine mantiene elevata la pressione interstiziale, riducendo così la

resistenza d'attrito e contribuendo altresì all'espansione dei lobi stessi (Major, 1996). Ciò rivela l'inadeguatezza dei modelli alla Bingham nelle ipotesi di fissato carico di snervamento: tali modelli sono infatti capaci di simulare soltanto la reologia di misture di colate detritiche composte da acqua e frazioni di sedimenti fini. Quando tali modelli vengono impiegati per simulare la reologia di misture di colate detritiche con presenza di particelle di grosse dimensioni, evidenziano, come precedentemente anticipato, i propri limiti dovuti all'incapacità di riprodurre le collisioni tra i singoli grani delle particelle di materiale grossolano tra loro e/o con le pareti di contorno, che invece influenzano enormemente il comportamento delle colate di detriti (Costa e Williams, 1984; Major e Pierson, 1992).

3.4 Modello reologico quadratico

O'Brien e Julien (1985) hanno sviluppato il modello reologico quadratico basandosi su sperimentazioni di laboratorio condotte su campioni di materiale prelevate dalle zone rocciose centrali del Colorado.

O'Brien et al. (1988) affermano che la natura non newtoniana dei flussi iper-concentrati sia il risultato di molteplici processi fisici ed in particolare che la totalità degli sforzi di taglio dei flussi iper-concentrati sia rappresentata dalla somma di cinque componenti di sforzo rappresentabili dalla seguente equazione:

$$\tau = \tau_c + \tau_{mc} + \tau_v + \tau_t + \tau_d$$

dove lo sforzo di soglia τ_c deriva dalla natura coesiva delle particelle di sedimenti fini, gli sforzi alla Mohr-Coulomb τ_{mc} e gli sforzi di taglio viscosi τ_v appartengono alle particelle fluide viscosi, mentre gli sforzi turbolenti τ_t e gli sforzi dispersivi τ_d tengono conto delle collisioni delle particelle a pezzatura grossolana.

Quando questi sono indicati in funzione del gradiente di velocità dv/dy , è possibile ricavare l'equazione caratteristica del modello reologico quadratico:

$$\tau = \tau_y + \eta \left(\frac{dv}{dy} \right) + C \left(\frac{dv}{dy} \right)^2$$

dove: $\tau_y = \tau_c + \tau_{mc}$ e $C = \rho_m l^2 + f(\rho_m, C_v) d_s^2$

In queste equazioni η è la viscosità dinamica, τ_c è la coesione dello sforzo di soglia; lo sforzo di Mohr Coulomb $\tau_{mc} = p_s \tan \varphi$ che dipende dalla pressione intergranulare p_s e dall'angolo di attrito interno del materiale φ ; C invece indica il coefficiente di sforzo inerziale, il quale dipende a sua volta dalla densità di massa della mistura ρ_m e dalla lunghezza di mescolamento di Prandtl l , la dimensione dei sedimenti d_s e una funzione della concentrazione volumetrica C_v . Bagnold definì la relazione $f(\rho_m, C_v)$ come:

$$f(\rho_m, C_v) = a_i \rho_m \left[\left(\frac{C_*}{C_v} \right)^{1/3} - 1 \right]$$

dove $a_i = (\approx 0.01)$ è un coefficiente empirico e C_* è la concentrazione massima delle particelle di sedimento in condizioni statiche. Fu Takahashi (1979) a notare che il coefficiente a_i poteva variare di diversi ordini di grandezza. Ulteriori studi condotti da Egashira et al. (1989) suggerirono una diversa formulazione rispetto a quella presentata da Bingham:

$$f(\rho_s, C_v) = \frac{\pi}{12} \left(\frac{6}{\pi} \right)^{1/3} \sin^2 \alpha_i \rho_s (1 - e_n^2) C_v^{1/3}$$

dove il coefficiente di restituzione dell'energia e_n dopo l'impatto in caso di sabbia varia all'interno dell'intervallo $0.70 < e_n < 0.85$, mentre α_i è l'angolo medio d'impatto delle particelle e ρ_s è la densità di massa delle particelle di sedimento.

I primi due termini di sforzo del modello reologico quadratico si riferiscono agli sforzi alla Bingham. La somma degli sforzi di soglia e di quelli viscosi definisce gli sforzi totali di una colata coesiva in condizione di regime di flusso viscoso. L'ultimo termine è la somma degli sforzi dispersivi e turbolenti e definisce un regime di moto inerziale per le colate detritiche fangose. Questo termine è funzione al quadrato del gradiente della velocità. Un'analisi di questi sforzi e dei loro ruoli nella propagazione dei flussi iper-concentrati può essere trovata in Julien e O'Brien (1987, 1993), che, inoltre, affermano che un modello di colata detritica che comprende soltanto sforzi alla Bingham e ignora gli sforzi inerziali assume che la propagazione dei flussi iperconcentrati sia dominata dagli sforzi viscosi. Questa ipotesi di base, però, non è universalmente appropriata, dato che osservazioni di campo hanno dimostrato che alcune colate detritiche fangose possono avere un comportamento decisamente turbolento, con velocità che superano 8 m/s. Inoltre anche colate detritiche con concentrazioni superiori al 40% di volume possono essere turbolente (O'Brien, 1986). In relazione alle proprietà della matrice del fluido, la viscosità e lo sforzo di soglia per concentrazioni elevate di sedimenti possono risultare relativamente piccole se comparate con gli sforzi turbolenti. Se il moto è controllato principalmente dagli sforzi viscosi si registreranno velocità basse, mentre se la viscosità e lo sforzo di soglia sono basse gli sforzi turbolenti saranno predominanti e pertanto le velocità saranno elevate.

3.5 Modello di Herschel-Bulkley

A partire dagli anni '90, per la simulazione dei fenomeni di colata di detrito, molti autori hanno proposto l'uso del modello reologico alla Herschel-Bulkley (Major e Pierson 1992; Coussot 1995; Atapattu et al. 1995), anch'esso appartenente alla famiglia dei modelli viscoplastici.

Il modello di Heschel- Bulkley è descritto secondo la seguente equazione:

$$\tau = \tau_y + k \dot{\gamma}^n$$

dove τ e τ_y rappresentano rispettivamente lo sforzo di taglio ed il valore di soglia che deve essere superata per ottenere un comportamento fluido, $\dot{\gamma}$ il gradiente della velocità, mentre k e n rappresentano, rispettivamente, l'indice di consistenza e di pseudoplasticità (Sosio et al. 2006).

Analizzando il coefficiente di pseudoplasticità n , si osserva che per valori $n < 1$ la miscela ha un comportamento di tipo "shear thinning flow", tipico dei fluidi viscoplastici; mentre quando il suindicato coefficiente assume valori $n > 1$, si osserva un comportamento di tipo "shear thickening", tipico dei fluidi dilatanti, dove la presenza predominante degli sforzi viscosi è sostituita dalla presenza degli sforzi tangenziali (Kaitna et al., 2007).

Tale modello è pertanto idoneo a riprodurre numericamente il comportamento "shear thinning" caratteristico delle miscele di colate detritico-fangose composte principalmente da acqua, argilla e sedimenti (Coussot, 1998).

Le analisi condotte in ambiente di laboratorio, atte a validare l'applicabilità di tale modello alla simulazione di colate di detrito sono state numerose. Particolarmente rilevanti sono da segnalare i risultati ottenuti da Coussot e Piau (1995a,b), mediante i quali è stato possibile evincere che il modello Herschel-Bulkley può essere applicato con successo a colate di detrito aventi frazione fine (> 40 mm) maggiore del 10%. Ulteriori esperimenti condotti successivamente da Coussot et al. (1998) hanno evidenziato che il modello di Herschel-Bulkley ben si adatta a rappresentare la reologia del materiale e che, aggiungendo particelle grossolane ($d \geq 25$ mm) a miscugli costituiti prevalentemente da frazione fine (limo e argilla), l'esponente n e il rapporto k/τ_y della legge reologica restano costanti. In seguito, studi condotti da Malet et al. (2003) hanno dimostrato come all'aumentare della concentrazione di materiale, si registri anche un aumento dei valori dei parametri reologici caratteristici τ_y e k della relazione di Herschel-Bulkley.

3.6 Modello dilatante

Il modello dilatante è stato applicato nel campo delle colate di detrito da Takahashi (1978, 1980, 1981). Egli formulò un modello di movimento che assimila i fenomeni di colata detritica a correnti non-newtoniane, basandosi sul concetto di pressione dispersiva causata dalla collisione tra particelle (concetto studiato sperimentalmente da Bagnold (1954)).

Il modello dilatante si basa sulla proprietà di "dilantancy" riconosciuta già da Reynolds nel 1889. Tale proprietà descrive la presenza nel materiale di pressioni dispersive che si sviluppano quando le singole particelle interagiscono fra di loro; se tale fenomeno è predominante il regime di moto viene definito granulare-inerziale (Bagnold, 1954); se le interazioni sono trascurabili si ha una modifica delle proprietà viscosive del fluido interstiziale e il regime di moto viene definito macro-viscoso e la risposta costitutiva è essenzialmente di tipo newtoniano.

La curva reologica che caratterizza il modello dilatante è quella individuata per il regime granulo-inerziale da Bagnold, dove gli sforzi tangenziali sono definiti come:

$$\tau = a \sin \varphi \rho_s \delta^2 d_{50}^2 \left(\frac{dv}{dz} \right)^2$$

dove φ è l'angolo di attrito interno dinamico, d_{50} è il diametro caratteristico della particella, δ è la concentrazione lineare dei granuli, a è una costante che è pari a 0.24

per concentrazione lineare compresa tra 14 e 17 e pari a 0.042 per concentrazioni lineari maggiori di 14. La concentrazione lineare δ viene espressa dalla seguente equazione:

$$\delta = \frac{C_v^{1/3}}{C_{\max}^{1/3} - C_v^{1/3}}$$

dove C_v è la concentrazione di volume e C_{\max} è la massima concentrazione possibile.

Tale relazione considera che il contributo agli sforzi tangenziali sia essenzialmente dovuto agli urti tra i granuli, ritenendo quindi trascurabile la deformazione del fluido interstiziale a causa della irrilevante quantità di materiale coesivo in sospensione nella corrente. Tale espressione, ripresa anche da Takahashi, viene applicata alle colate detritiche ipotizzando che il moto della colata approssimi condizioni di moto uniforme, schematizzazione di fatto ammissibile sulla base delle osservazioni delle forme dei fronti e dei corpi delle colate detritiche; in condizioni di moto uniforme gli sforzi tangenziali (calcolati secondo il modello di Bagnold) sono bilanciati dalla componente longitudinale della forza peso.

Il modello dilatante presenta il non trascurabile vantaggio di dipendere da parametri fisici non eccessivamente complessi da determinare (concentrazione, granulometria e densità della frazione solida);

3.7 Modello di Voellmy

Il modello Voellmy (1955) è un modello a centro di massa inizialmente ideato per la propagazione di valanghe ed inoltre adottato per molti anni per la perimetrazione delle aree a rischio di valanga in Svizzera (Salm et al., 1990).

Tale modello è basato sull'ipotesi che la dinamica di una valanga possa essere analizzata attraverso lo studio del moto del suo baricentro lungo una traiettoria predefinita, rappresentata dal profilo longitudinale del pendio. Il pendio viene suddiviso in maniera molto semplificata in due tratti distinti entrambi a pendenza costante e che rappresentano rispettivamente la zona di propagazione e la zona di deposito.

Facendo riferimento alla zona di propagazione la resistenza del fluido lungo la superficie di pendenza β è data dalla somma di un termine di attrito di tipo Coulombiano e di un termine turbolento di tipo idraulico (formula di Chezy):

$$\tau = \rho g h \cos \beta \tan \varphi_b + \rho g \frac{V^2}{\xi}$$

dove ρ è densità del fluido, h lo spessore del flusso, φ_b l'angolo di attrito alla base e ξ il parametro di turbolenza.

Hungr e Morgenstern (1984) osservarono che le colate composte da materiale granulare non coesivo mostrano sempre proprietà di tipo attritivo. Sebbene risulta necessario tener conto del termine turbolento in presenza di pressioni interstiziali. Infatti in presenza di pressioni interstiziali l'angolo di attrito alla base φ_b viene mediato dalla pressione interstiziale in accordo al principio degli sforzi effettivi e che anche è molto minore del coefficiente di attrito interno del materiale, φ :

$$\tan \varphi_b = (1 - r_u) \tan \varphi$$

dove r_u è il coefficiente di pressione interstiziale definito come il rapporto tra la pressione interstiziale e gli sforzi normali.

I valori tipici dei parametri di resistenza caratteristici del modello di Voellmy (μ e ξ) sono stati discussi in passato da differenti autori (ad esempio Schaerer, 1975; Buser e Fruitiger, 1980; Martinelli et al., 1980).

Hungr & Evans (1996), sulla base dell'analisi a ritroso su 23 valanghe di roccia con il modello di tipo continuo bi-dimensionale DAN, stabilirono che le simulazioni che utilizzano le relazioni reologiche Attritiva e Bingham sovrastimano sistematicamente le velocità osservate, mentre la reologia Voellmy è la più adeguata sia per la stima delle velocità che per quella relativa a lunghezza e spessore dei depositi.

Ulteriori applicazioni della reologia Voellmy sono state condotte da Revellino et al. (2004). Quest'ultimi hanno riscontrato ottimi risultati di adattamento del modello reologico per la simulazione di 19 colate detritiche costituite essenzialmente da materiale piroclastico.

4. APPLICAZIONE DI CODICI DI PROPAGAZIONE E DI ARRESTO IN CONDIZIONI IN CONFLUENZA

4.1 Generalità

I modelli di propagazione di colate detritiche sono largamente utilizzati per la mappatura del rischio idrogeologico e inoltre per la valutazione dell'efficienza delle opere di mitigazione. Sebbene allo stato attuale è possibile affermare che manchi a livello scientifico un confronto sistematico dei differenti approcci che caratterizzano i diversi modelli usualmente impiegati.

In tale contesto si inserisce parte del presente lavoro di tesi volto ad effettuare un confronto tra due dei più accreditati modelli presenti nel mercato. In particolare, all'interno del presente capitolo viene presentata l'applicazione di due differenti modelli di propagazione per la riproduzione di un evento realmente accaduto. E precisamente: il FLO-2D (O'Brien, 1986) che è un codice commerciale largamente adottato in campo internazionale e il TRENT-2D (Armanini et al., 2009) che ad oggi è stato utilizzato nell'ambito di diversi lavori sia di ricerca teorica che applicata. Entrambi i modelli adottano equazioni integrate sulla verticale, ma descrivono i fenomeni di propagazione delle colate detritiche attraverso differenti equazioni matematiche. Il modello FLO-2D non è un modello pienamente bidimensionale e adotta un approccio reologico monofasico, modellato attraverso relazioni empiriche sviluppate da O'Brien e Julien (1985); il modello TRENT-2D è pienamente bidimensionale e assume un approccio bifase per la schematizzazione della reologia della colata, basandosi sul più sofisticato metodo granulo-inerziale di Bagnold-Takahashi (1978). Altre importanti differenze tra i modelli: il FLO-2D è un modello a fondo fisso, mentre il TRENT-2D è capace di tener conto della variazione del fondo in maniera accoppiata alla dinamica della mistura, anche se non è possibile simulare la presenza di zone inerodibili.

Al fine di evidenziare in modo sistematico le differenze tra le due metodologie, i due modelli sono stati applicati ad un complesso caso realmente accaduto di colate di detrito. L'evento a cui si fa riferimento è quello del 1 Ottobre 2009 che ha interessato la provincia di Messina, durante il quale in poche ore l'intenso evento meteorico ha generato in un'area di 60 km² più di 600 colate detritiche, causando 37 decessi e seri danni alle infrastrutture oltre che ad edifici pubblici e privati. In particolare, nel presente lavoro è stato analizzato il caso di Giampilieri, che è stato il villaggio maggiormente colpito dall'alluvione.

Al fine di modellare le colate di detrito, tre tipologie di dati sono stati presi in considerazione: il modello digitale del terreno (DTM), i dati idrologici e le proprietà reologiche della mistura di acqua e sedimenti. Sebbene i primi due dati in ingresso alle simulazioni sono stati considerati identici per entrambi i modelli adottati, le proprietà reologiche sono realmente in maniera differente proprio a causa dei differenti modelli reologici assunti alla base di ciascun modello.

Le simulazioni effettuate per la modellazione dell'evento alluvionale di Giampilieri hanno richiesto, per l'adozione del codice FLO-2D, alcune analisi

preliminari volte alla calibrazione dei parametri reologici. Mentre per quanto concerne l'adozione del codice TRENT-2D, essendo basato su metodi più fisicamente basati non è stato necessario procedere ad operazioni di taratura per i parametri reologici che, invece sono stati scelti facendo riferimento ai dati usualmente adottati per colate detritiche avvenute nel territorio messinese.

Infine all'interno del presente capitolo è presentata un'analisi approfondita delle analogie e differenze e l'individuazione dei campi di applicabilità dei due codici facendo particolare attenzione al comportamento in condizione di confluenza.

4.2 Descrizione dei modelli adottati

4.2.1 Descrizione del modello FLO-2D

Il modello FLO-2D, codice commerciale sviluppato da J. S. O'Brien, è uno strumento riconosciuto a livello internazionale come particolarmente efficace per la delimitazione delle zone a rischio di inondazione e per la conseguente progettazione di opere di mitigazione. Esso permette la simulazione del deflusso sia di portate liquide, sia di portate solide caratterizzate da un consistente trasporto di massa (trasporto solido, colate di fango o detritiche); in particolare, il modello è a fondo fisso in caso di simulazioni di colate detritiche e a fondo mobile per simulazioni di trasporto ordinario.

Per la realizzazione delle simulazioni, i dati in ingresso sono costituiti dal modello digitale del terreno e dalle caratteristiche sedimentologiche e reologiche della miscela di acqua-sedimento di interesse.

Il modello è fornito di un pre-processore, il GDS, che consente di schematizzare l'area di studio attraverso una griglia a maglia regolare, derivata dai dati provenienti dal modello digitale del terreno. Il dominio di calcolo viene così costituito da un sistema di celle che rappresenta la superficie alluvionale, ovvero la *floodplain*.

Tra le caratteristiche peculiari del modello FLO-2D, deve essere sottolineata la possibilità di effettuare una gestione integrata e completa del territorio studiato, anche in presenza di ambienti urbani. Infatti, tramite l'utilizzo di questo software è possibile includere nell'analisi la presenza di ostacoli al deflusso superficiale (case, edifici, etc), o di altri elementi di arredo urbano capaci di interferire in maniera rilevante come ad esempio ponti, strade, reti di condotte, serbatoi, argini (Figura 4.1).

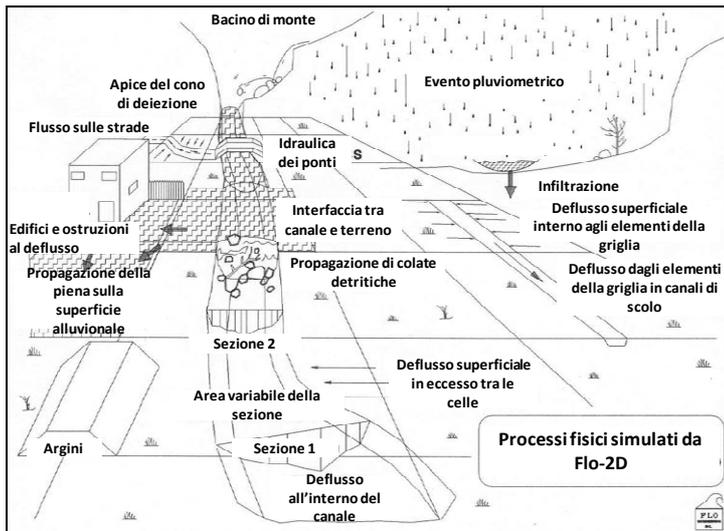


Figura 4.1 Rappresentazione dei processi fisici simulati da FLO-2D.

Inoltre, il modello prevede la possibilità di accoppiare ad una simulazione di tipo quasi-bidimensionale sulla superficie del terreno, una simulazione monodimensionale del deflusso lungo i canali principali. Essi vengono rappresentati con una rete di elementi sovrapposti alla maglia di celle quadrate. Ciò evidentemente consente di stimare la propagazione della piena lungo canali di sezione qualsiasi, tenendo conto degli scambi di portata tra rete idrografica ed aree allagate (Figura 4.2).

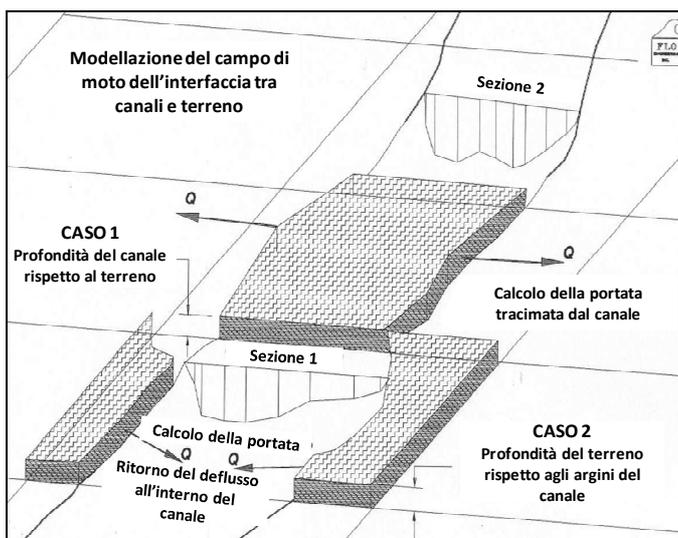


Figura 4.2 Rappresentazione della modellazione del campo di moto dell'interfaccia tra canali e terreno.

L'andamento dei tiranti e del campo di velocità si calcola attraverso l'equazione di continuità e l'equazione della conservazione della quantità di moto. Questo sistema viene risolto mediante uno schema alle differenze finite. Il trasporto solido viene risolto in modo disaccoppiato rispetto al problema idrodinamico.

Il programma tratta la propagazione dell'onda di piena nel canale principale (alveo inciso) risolvendo le equazioni di De Saint-Venant, mentre le aree golenali e quelle esterne ai rilevati arginali (floodplain) sono modellate attraverso un approccio bidimensionale.

Come accennato sopra, le equazioni che governano il moto sono quelle di de Saint Venant:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hv_x)}{\partial x} + \frac{\partial(hv_y)}{\partial y} = i$$

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{v_x}{g} \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{v_y}{g} \frac{\partial v_x}{\partial y} - \frac{1}{g} \frac{\partial v_x}{\partial t}$$

$$S_{fy} = S_{oy} - \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{v_y}{g} \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{v_x}{g} \frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial v_y}{\partial t}$$

dove h è il tirante idrico e V_x e V_y le velocità medie lungo le coordinate x e y , t è il tempo, i è la variazione di volume per unità di tempo e superficie prodotta da altri fenomeni, quali la precipitazione o l'infiltrazione nel terreno. S_{fx} ed S_{fy} rappresentano le perdite di carico unitarie, cioè le cadenti per le rispettive direzioni, mentre S_{ox} e S_{oy} sono le pendenze dell'alveo.

Il calcolo delle perdite di carico unitario per le varie direzioni può essere effettuato tramite la formula di Gauckler- Strickler:

$$S_{fx} = \frac{v_x \sqrt{v_x^2 + v_y^2}}{k_s^2 h^{2/3}} \quad S_{fy} = \frac{v_y \sqrt{v_x^2 + v_y^2}}{k_s^2 h^{2/3}}$$

in cui k_s è il coefficiente di scabrezza di Strikler.

Un'altra notevole peculiarità del programma FLO-2D è che, a differenza di altri codici bidimensionali, esso è in grado di gestire sia flussi subcritici che flussi supercritici.

La soluzione delle equazioni è sviluppata tramite un modello esplicito alle differenze finite.

Il campo di moto, come prima anticipato, viene suddiviso in una maglia quadrata di celle, che costituiscono la floodplain. La soluzione delle equazioni viene effettuata in forma disaccoppiata: in funzione dello stato idrometrico ad un dato istante si risolve l'equazione del moto, calcolando i volumi scambiati tra celle contigue nel corso di un passo temporale di calcolo. In funzione di tali valori, viene poi calcolato per ogni cella il nuovo stato idrometrico, valutando il bilancio di massa, attraverso la forma integrale:

$$h^{(i+1)} = h^{(i)} + \Delta h = h^{(i)} + \left(\frac{1}{\Delta x^2} \cdot \sum_i Q_i + u_j^{(i+1)} + j_p^{(i+1)} \right) \cdot \Delta t$$

dove Δx^2 è l'area della cella, Q_i è il contributo di portata – positivo se entrante – della i -esima cella limitrofa, u_i è la velocità di infiltrazione, j_p è l'intensità di precipitazione e Δt è il passo temporale di calcolo.

La natura esplicita dello schema di risoluzione richiede il rispetto della condizione di stabilità di Courant-Friedrich-Lewy (Jin & Fread, 1997):

$$\Delta t \leq C \frac{\Delta x}{v + c}$$

dove C è il numero di Courant ($C < 1$), Δx è il passo spaziale della maglia di calcolo, v è la velocità media del moto e c è la celerità d'onda.

4.2.2 Descrizione del modello TRENT-2D

TRENT-2D è un codice numerico sviluppato da Armanini et al. (2009) per la simulazione delle colate di detrito e per il trasporto di flussi iperconcentrati in generale.

Il modello matematico del modello si basa sull'assunto che la mistura sia composta da una miscela bifase di sedimenti e acqua, con un modello reologico basato sull'approccio granuloso-inerziale, le relazioni di riferimento sono quelle di Bagnold (1954) integrate sulla profondità e modificate da Takahashi (1978) sulla base di dati sperimentali.

Considerando che il modello è bifasico, l'evoluzione del fondo è tenuta in considerazione. Inoltre la dinamica della mistura e l'evoluzione morfologica del fondo sono risolte in modo accoppiato. Ciò rappresenta una importante caratteristica del modello, in quanto la variazione delle celerità diventa importante passando da fondo fisso a fondo mobile.

Le equazioni mediate sulla verticale sono quelle della conservazione della massa e dei momenti per la fase solida e per quella liquida che in formule:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(z_B + h) + \frac{\partial}{\partial x}(hv_x) + \frac{\partial}{\partial y}(hv_y) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial t}(c_B z_B + ch) + \frac{\partial}{\partial x}(chv_x) + \frac{\partial}{\partial y}(chv_y) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial t}[c_\Delta v_x h] + \frac{\partial}{\partial x} \left[c_\Delta \left(v_x^2 h + \frac{gh^2}{2} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} [c_\Delta v_x v_y h] + c_\Delta gh \frac{\partial z_B}{\partial x} = -Fv_x \\ \frac{\partial}{\partial t}[c_\Delta v_y h] + \frac{\partial}{\partial x} [c_\Delta v_x v_y h] + \frac{\partial}{\partial y} \left[c_\Delta \left(v_y^2 h + \frac{gh^2}{2} \right) \right] + c_\Delta gh \frac{\partial z_B}{\partial y} = -Fv_y \end{cases}$$

dove h è il tirante della colata detritica; v_x e v_y sono le velocità mediate sulla verticale in direzione x e y rispettivamente; z_B è l'elevazione del fondo; c è la concentrazione della fase solida; c_b è la concentrazione della fase solida nel terreno; $c_\Delta = (1 + \Delta c)$ dove Δ è la densità relativa della fase solida. Il termine di attrito $F = F(|v|, h)$ deriva dalla relazione di Bagnold modificata da Takahashi (1978) sulla base di dati sperimentali:

$$F = 25/4(1 + \Delta) \sin \varphi \lambda^2 Y^2$$

dove φ è l'angolo di attrito interno:

$$\lambda = \left[(c_b / c)^{1/3} - 1 \right]^{-1} ; \quad Y = h / (d_{50} \sqrt{a})$$

dove d_{50} è il diametro mediano è una costante (Takahashi, 1978).

La concentrazione è calcolata come una funzione delle variabili del moto:

$$c = \beta c_b (u^2 / gh)$$

dove la capacità di trasporto β è un parametro adimensionale.

Lo schema numerico adottato è accurato al secondo ordine nel tempo e nello spazio, è basato sui volumi finiti considerando l'approccio di Godunov su una struttura a griglia. Lo schema segue inoltre lo schema esplicito nel tempo di MUSCL-Hancock. Il flusso numerico all'interfaccia tra le celle è stato determinato usando il solutore LHL Riemann (Fraccarollo et al. 2003), che permette di considerare i termini non conservativi dovuti alle discontinuità del fondo.

Maggiori dettagli sullo schema numerico e sul modello numerico possono rilevarsi su TRENT2D User's Manual (2011).

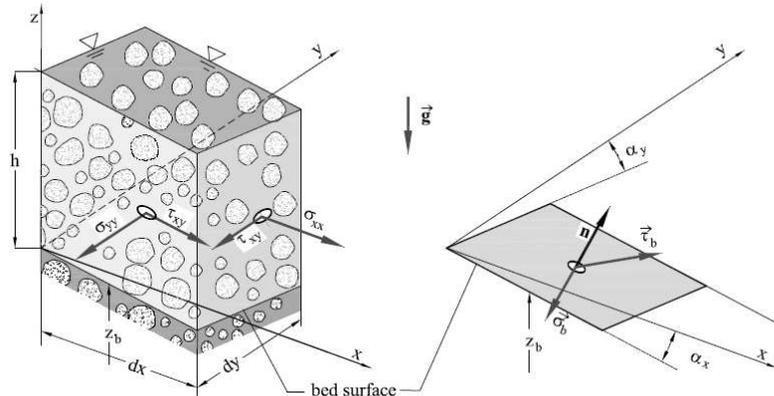


Figura 4.3 Sistema di riferimento adottato nella modellazione e definizione delle variabili per TRENT2D (Manuale TRENT2D, 2011).

4.3 Inquadramento geografico del territorio colpito dall'alluvione del 1 ottobre 2009 e descrizione sintetica delle colate verificatesi

L'inquadramento geografico del territorio e le descrizioni degli eventi di colate detritiche verificatesi l'1 ottobre 2009 nel territorio messinese viene qui di seguito presentato con particolare riguardo a quanto avvenuto all'interno del villaggio di Giampileri. L'evento di Giampileri, infatti, è stato adottato da qui scrive come caso studio su cui validare i diversi modelli numerici adottati. Di seguito la descrizione viene effettuata distinguendo i differenti bacini idrografici coinvolti (bacini del torrente Giampileri, del torrente Loco, del torrente Sopra Urno e del torrente Puntale) che sono descritti anche per mezzo del supporto fotografico acquisito durante i numerosi sopralluoghi effettuati a corredo dello studio condotto.

4.3.1 Bacino idrografico del torrente Giampileri

Il villaggio di Giampileri è caratterizzato da un impianto settecentesco; tale agglomerato urbano ha una peculiare configurazione in termini sia geomorfologici e sia

come sviluppo urbano. Pertanto, le colate di detrito analizzate in esito all'evento del 1 ottobre 2009 in questo caso risultano esser di particolare interesse.

L'abitato storico di Giampilieri Superiore si colloca lungo la sponda sinistra del Torrente Giampilieri, tra la quota 100 m s.l.m.m. e la quota 70 m s.l.m.m.; inoltre sono presenti alcuni edifici privati e pubblici di più recente costruzione in sponda destra a quota 75 m s.l.m.m. I versanti a monte del centro abitato di Giampilieri Superiore si presentano molto acclivi, con una pendenza media intorno ai 30°-40° e, localmente, raggiungono anche valori superiori a 60°.

L'area urbana è caratterizzata da una elevata densità abitativa che si traduce, in particolar modo, nella presenza di strade piccole realizzate lungo le linee di massima pendenza che durante gli eventi meteorici si trasformano in "alvei- strada".

Il terreno è composto da materiale metamorfico, facilmente erodibile anche per il clima semiarido della regione, caratterizzato da eventi meteorici di breve durata ma di elevate intensità che accadono usualmente tra ottobre e marzo.

Nella zona a monte dell'abitato di Giampilieri, sorgono tre differenti torrenti che prendono i nomi, procedendo da Ovest verso Est di: torrente Loco, torrente Sopra Urno e torrente Puntale (Figura 4.4).

Tutti i torrenti sono caratterizzate da modeste estensioni, rispettivamente di 1km² per il bacino Loco, 0.7km² per il bacino del Sopra Urno e di 0.4 km² per il bacino del Puntale (Figura4.5).

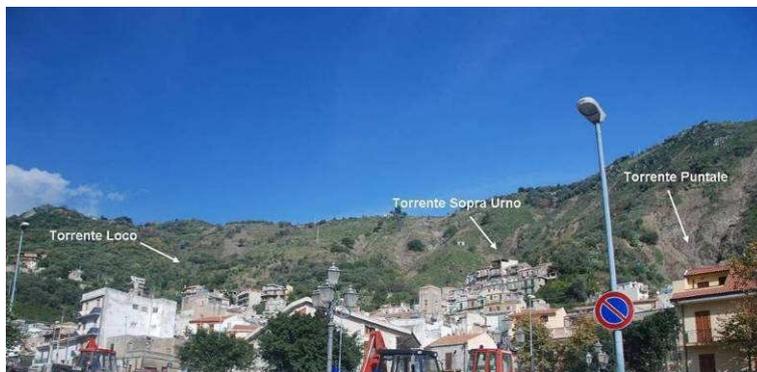


Figura 4.4 Vista d'insieme dell'abitato di Giampilieri e degli affluenti al torrente Giampilieri (Torrenti Loco, Sopra Urno e Puntale) che attraversano il centro abitato.

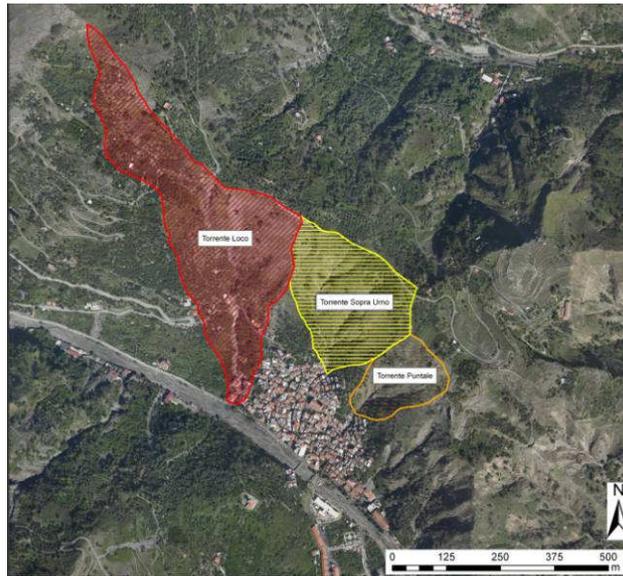


Figura 4.5 Immagine dell'abitato di Giampilieri, dove sono indicate le estensioni dei bacini del Loco, Sopra Urno e Puntale.

Le zone di innesco delle numerose colate detritiche che hanno interessato il pendio di Giampilieri Superiore sono localizzate a diverse quote, quasi sempre nel settore superiore del versante. Il materiale si è quindi diretto verso valle seguendo, dove disponibili, le linee di impluvio preesistenti.

I flussi sono stati alimentati dall'erosione e dallo sradicamento dei depositi detritici del suolo e della vegetazione sovrastante e, localmente, dalla distruzione di terrazzamenti contenuti dai muretti a secco. Questa alimentazione di materiale ha reso alcuni flussi, in particolare quello sviluppatosi a monte della Via Vallone, estremamente densi, conferendo loro un alto potere distruttivo.

Durante il loro percorso all'interno delle vie del paese, che come detto costituiscono "alvei-strada", i flussi hanno subito un notevole aumento di altezza, densità e potere distruttivo a causa della riduzione della sezione utile e della presa in carico di parti di edifici distrutti, automobili ed altri oggetti travolti.

Si precisa che le informazioni che seguono relative all'inquadramento geografico del territorio e agli eventi di colate detritiche verificatesi l'1° ottobre 2009, sono state acquisite dalla relazione redatta dai consulenti del Commissario Delegato, intitolata "Descrizione dei dissesti e degli interventi immediati nei centri abitati di Altolia, Molino, Giampilieri, Giampilieri Marina" (Casagli N., Foti E., Maugeri, 2009).

In particolare, verranno descritti alcuni sottobacini del torrente Giampilieri e, precisamente, i bacini del torrente Loco, del torrente Sopra Urno e del torrente Puntale, che sono quelli oggetto dal presente studio numerico.

4.3.1.1 Torrente Loco

Il torrente Loco attraversa il margine settentrionale dell'abitato di Giampilieri. L'impluvio interessa il versante in sponda sinistra del torrente Giampilieri. Ha inizio a quota circa 307 m s.l.m.m. e sbocca nel torrente suddetto a quota 99 m s.l.m.m., dove affluisce dopo aver attraversato la strada provinciale 33 mediante una struttura scatolare a due canne (vedere Figura 4.6).



Figura 4.6 Torrente Loco: immissione nel torrente Giampilieri in corrispondenza della strada provinciale n. 33.

Dalla strada provinciale verso monte il corso del torrente scorre inizialmente tra alcune abitazioni di recente costruzione (vedere Figura 4.7) e quindi sul versante, inizialmente con pendenza ridotta. In questo primo tratto per effetto di colate detritiche si è avuto il deposito del materiale eroso con spessore fine m. 3,00. Successivamente le acque hanno provocato una notevole incisione dell'impluvio mettendo a nudo il substrato roccioso (vedere Figura 4.8) fino all'altezza dell'incrocio con la strada comunale Calvario.

La superficie scoscesa si allarga quindi verso monte sino alla strada provinciale Molino-Briga che corre lungo il crinale in corrispondenza della quale ha avuto inizio lo scoscendimento del versante (Figura 4.9).



Figura 4.7 Torrente Loco: a) inquadramento della frana, b) edifici interessati dalla colata detritica nel tratto di valle.



Figura 4.8

Torrente Loco: messa a nudo della roccia a valle della strada comunale Calvario e presenza di vasche ad uso irriguo in alveo.



Figura 4.9

Torrente Loco: inizio scosendimento in corrispondenza della strada provinciale che corre lungo il crinale.

4.3.1.2 Torrente Sopra Urno e lo scenario prodotto dall'evento

Il torrente Sopra Urno è ubicato a ridosso della posizione centrale dell'abitato di Giampilieri (vedere Figura 4.10). L'impluvio interessa il versante in sponda sinistra del torrente Giampilieri. Ha inizio a quota 302 m s.l.m.m. con recapito finale nel torrente Giampilieri a quota 86 m s.l.m.m. Nel tratto terminale il corso d'acqua interessa la sede stradale della via Chiesa, che attraversa centralmente l'abitato e ne rappresenta l'asse storico, fino a raggiungere la strada provinciale 33.

In occasione del 1 ottobre 2009 le colate, che hanno interessato più incisioni (Figura 4.11) e che sono confluite nell'asta principale del torrente Sopra Urno, hanno avuto inizio subito a valle della strada provinciale Molino-Briga che corre lungo il crinale.



Figura 4.10 Vista frontale della frana generatasi all'interno del bacino Sopra Urno, a ridosso dell'abitato di Giampileri Superiore.



Figura 4.11 Individuazione della frana su Via Chiesa - Torrente Sopra Urno.

A ridosso dell'abitato la colata di fango ha anche interessato alcune opere di stabilizzazione presenti in alveo, realizzate con gabbionate dall'Ufficio del Genio Civile di Messina a seguito di un evento franoso che nel 2007 aveva già interessato lo stesso sottobacino (vedere Figura 4.12). Le citate opere di difesa sono state parzialmente distrutte dalla colata stessa, che ha poi proseguito lungo la via Chiesa. In particolare nella piazza adiacente alla chiesa si sono depositati ingenti quantità di materiale detritico per uno spessore di circa m 3,00, costituito anche da massi di notevole pezzatura (vedere Figura 4.13). La colata detritica, inoltre, ha invaso anche le strade adiacenti e i corrispondenti piani terrani delle abitazioni.



Figura 4.12 Torrente Sopra Urno: opere di protezione realizzate dal Genio Civile di Messina a seguito dell'evento del 2007.



Figura 4.13 Torrente Sopra Urno: a) colata di fango che ha interessato la via Chiesa; b) piazza di fronte alla chiesa invasa dal fango.

4.3.1.3 Torrente Puntale

Il torrente Puntale è ubicato anch'esso a ridosso dell'abitato di Giampilieri, adiacentemente al bacino del torrente Sopra Urno. Si tratta di un impluvio che interessa il versante in sponda sinistra del torrente Giampilieri che ha inizio a quota 284 m s.l.m.m. e ha recapito finale nel torrente Giampilieri a quota 79 m s.l.m.m.. Nel tratto terminale si svolge interamente sulla sede stradale della via Vallone, che attraversa centralmente l'abitato fino a raggiungere la piazza Pozzo e successivamente la strada provinciale 33.

Lo scoscendimento, composto da due incisioni principali confluite nel torrente Puntale, ha avuto inizio a valle dello spartiacque (vedere Figura 4.14).

Raggiunta la via Vallone il materiale in frana ha investito le abitazioni poste ai margini della strada provocando il crollo di alcune e sommergendone altre, causando alcune vittime. In particolare ha investito una abitazione posta in asse con la parte superiore di via Vallone, dove la colata di fango ha raggiunto il livello di circa 6-7 m (Figura 4.15).

La colata proseguendo, quindi, lungo la via Vallone (Figura 4.16) fino al torrente Giampilieri ha depositato ingenti quantità di materiale detritico per uno spessore di circa m. 3,00 invadendo i piani terrani delle abitazioni e le strade adiacenti fino a piazza Pozzo, che rappresenta il punto più prossimo al torrente Giampilieri, in prossimità della

strada provinciale (vedere Figura 4.17), nonché l'antico punto di confluenza del torrente Puntale nel torrente Giampilieri.



Figura 4.14 Individuazione della frana su Via Vallone - Torrente Puntale.



Figura 4.15 Torrente Puntale: colata di fango in via Vallone pochi giorni dopo l'alluvione del 1° ottobre 2009. a) vista dall'alto dei resti delle abitazioni colpite dall'impatto della frana; b) vista lato del versante dei resti delle abitazioni su via Vallone.



Figura 4.16 Vista del percorso di frana sul bacino del torrente Puntale che si prolunga lungo l'abitato di via Vallone.

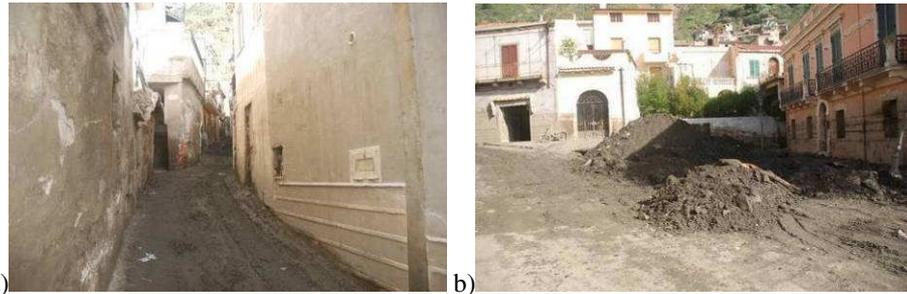


Figura 4.17 Torrente Puntale: a) tratto terminale della via Vallone già ripulita dalle colate di fango; b) Piazza Pozzo.

4.4 Dati di supporto alla modellazione

Per lo sviluppo del presente studio sono stati utilizzati differenti dati per la caratterizzazione della morfologia del territorio: la cartografia post evento scala 1:2000, le ortofoto dell'abitato di Giampilieri e dei versanti coinvolti rilevate da subito dopo l'evento del 1 ottobre 2009; la carta litotecnica scala 1:2000 degli spessori eluvio-colluviali del bacino relativo al Torrente Sopra Urno redatta post-evento; la carta del rischio geomorfologico scala 1:1000 redatta dal geologo Alvisè Ucosich nelle settimane immediatamente successive al 1 ottobre 2009. Per i dati idrologici come stazione di riferimento è stata scelta la stazione pluviometrica di Camaro poiché, tra quelle disponibili nella zona di interesse e che presentano una serie significativa di massimi annuali di breve durata (ovvero Ali terme, Messina Istituto Geofisico e Camaro), è quella che presenta il maggior numero di dati (57 anni, periodo 1929-2005) ed è posta ad una quota di 568 m l.m.m. che può essere ritenuta significativa per le aree per le quali di cui si stima delle portate al colmo.

Di seguito si riepilogano in maniera schematica i dati cartografici e i dati idrologici utilizzati citando le fonti da cui sono stati recepiti:

- per quanto concerne le informazioni cartografiche:
 - o Cartografia post-evento, in scala 1:2000, fornita dal Dipartimento Regionale della Protezione Civile;
 - o Ortofoto post-evento, fornite dal Dipartimento della Protezione Civile Regionale (volo Friuli Venezia Giulia);
 - o Fogli catastali relativi alle zone colpite, forniti dall'Ufficio del Genio Civile di Messina;
 - o Carta litotecnica scala 1:2000 degli spessori eluvio-colluviali del bacino relativo al Torrente Sopra Urno redatta post-evento, fornita dall'Ufficio del Genio Civile di Messina;
 - o Carta del rischio geomorfologico scala 1:1000 redatta dal geologo Alvisè Ucosich nelle settimane immediatamente successive al 1 ottobre 2009, fornita dall'Ufficio del Comune di Messina
- per quanto concerne i dati idrologici:
 - o dati di pioggia di massima intensità registrati alle seguenti stazioni pluviometriche ARRA: Camaro (2000-2001-2002-2003-2004-2005), forniti

dall'Osservatorio delle Acque, Dipartimento dell'Acqua e dei Rifiuti, Assessorato dell'Energia e dei Servizi di Pubblica Utilità della Regione Siciliana

4.5 Determinazione dei pletogrammi relativi alle colate detritiche sviluppate durante l'evento del 1 ottobre 2009

I pletogrammi relativi alle colate detritiche sviluppate durante l'evento del 1 ottobre 2009 nei bacini del torrente Loco, Sopra Urno e Puntale sono stati dedotti tramite alcune analisi di massima effettuate con l'ausilio di ortofoto post-evento, nonché, di dati acquisiti durante i numerosi sopralluoghi effettuati. Per quanto concerne la stima dei volumi, gli stessi sono stati valutati considerando che per l'intera area di frana si sia mobilitato uno spessore di colte detritica pari a 0.7 m.

Non disponendo di dati certi sulla dinamica con cui si sono sviluppati gli eventi, ed in particolare sulla tempistica che ha caratterizzato i flussi di fango che hanno interessato il centro abitato di Giampilieri, si è ipotizzato che il volume mobilitato sia defluito nei tre bacini considerati, ovvero quelli dei torrenti Loco, Sopra Urno e Puntale, in tempi differenti.

In particolare si è ipotizzato che in un primo momento un volume di materiale pari a 15400 m^3 , si sia instabilizzato in corrispondenza bacino del torrente Sopra Urno, tramite lo sviluppo di tre differenti pletogrammi di uguale entità con base temporale di 6 minuti e distanziati tra loro di 6 minuti. Le portate di picco di ogni pletogramma sono pari a $28.51 \text{ m}^3/\text{s}$, inoltre si è assunto che in corrispondenza di ogni pletogramma la concentrazione della colata detritica si sia mantenuta costante e pari a 0.5.

In fase di simulazione, si è inoltre assunto che con una differenza temporale di 6 minuti rispetto all'inizio della colata sul bacino del torrente Sopra Urno, si sia generata un'altra colata detritica sul torrente Puntale. In particolare, si è ipotizzato che questo fenomeno sia propagato lungo le due incisioni di detto bacino, in un tempo anch'esso pari a sei minuti, con un pletogramma la cui portata di picco pari a $30.33 \text{ m}^3/\text{s}$. Pertanto in questo caso si è ipotizzato che il volume complessivo di materiale instabilizzato, anch'esso costituito da acqua e sedimento in concentrazione di 0.5, sia stato di circa 5400 m^3 .

Infine in corrispondenza del torrente Loco, si è posto che si sia realizzato, contemporaneamente alla colata detritica che ha interessato il torrente Sopra Urno, un unico pletogramma, con uno sviluppo temporale di 8 minuti circa e con portate di picco pari a $89.74 \text{ m}^3/\text{s}$, corrispondenti a un volume complessivo di materiale instabilizzato di circa 21000 m^3 . Anche qui, a favore di sicurezza, si è assunto per la concentrazione un valore costante e pari a 0.5.

I pletogrammi che costituiscono i dati di ingresso dei tre differenti bacini, Sopra Urno, Puntale e Loco, sono riportati in Figura 4.18a,b e c. La Figura 4.18d mostra, invece, gli stessi pletogrammi in un unico grafico, in modo da evidenziare l'evoluzione globale del fenomeno di colata contemplando anche lo sfasamento temporale dei singoli eventi ipotizzati.

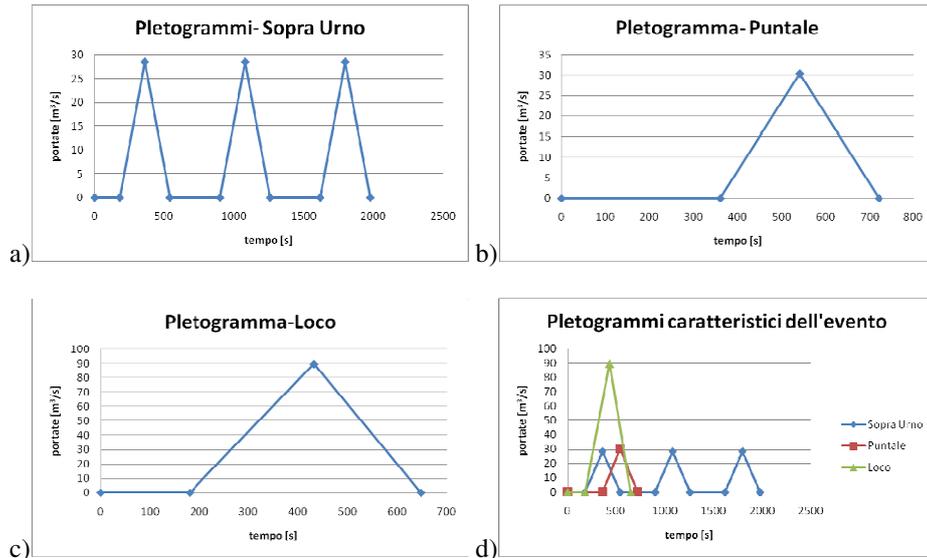


Figura 4.18 Pletogrammi utilizzati per la simulazione dell'evento del 1° ottobre 2009: a) sul bacino del torrente Sopra Urno; b) sul bacino del torrente Puntale; c) sul bacino del torrente Loco; d) visione globale dello sviluppo dell'evento.

4.6 Simulazioni effettuate per la calibrazione dei parametri reologici del Flo-2D

I parametri reologici richiesti per il codice di calcolo FLO-2D sono stati calibrati effettuando procedure di “back analysis” per la riproduzione dell'evento alluvionale avvenuto in corrispondenza del centro abitato di Giampilieri Superiore durante la notte del 1 ottobre 2009.

I dati di ingresso per le simulazioni effettuate sono rappresentati dai volumi delle coltri detritiche mobilitate durante l'evento, già definite al paragrafo precedentemente sotto forma di pletogrammi, e la conoscenza della morfologia dell'area, quest'ultima ricostruita tramite la cartografia post evento dei luoghi (scala 1:2000).

Al fine di effettuare la taratura del modello reologico implementato nel FLO-2D si sono ipotizzate diverse tipologie di materiale caratterizzate da differenti viscosità. La taratura del modello è stata sviluppata confrontando i risultati ottenuti dalle simulazioni con quelli rilevati dalla tavola redatta da Ucosich all'interno della quale vengono segnalati i livelli di deposito di materiale rilevati all'interno dell'abitato successivamente l'evento del 1 ottobre 2009.

Sono state assunte le seguenti formule empiriche per la valutazione rispettivamente della viscosità dinamica η (espressa in poise) e del carico limite τ_y (espressa in dine/cm²)

$$\eta = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v}$$

$$\tau_y = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v}$$

Dove C_v è la concentrazione volumetrica, assunta pari a 0.5, mentre per i valori dei parametri si è fatto riferimento ad alcuni valori di letteratura caratteristici di flussi a bassa, media ed elevata viscosità. In particolare, nella presente relazione sono state considerate tre tipologie di sedimento i cui parametri caratteristici sono:

- sedimento ad elevata viscosità ($\alpha_1=0.000602$; $\beta_1=33.1$; $\alpha_2=0.00172$; $\beta_2=29.5$);
- sedimento a media viscosità ($\alpha_1=0.006032$; $\beta_1=19.9$; $\alpha_2=0.00707$; $\beta_2=29.8$);
- sedimento a bassa viscosità ($\alpha_1=0.0648$; $\beta_1=6.20$; $\alpha_2=0.0765$; $\beta_2=16.9$).

Le simulazioni sono state effettuate suddividendo la porzione di area alluvionale interessata dall'evento con una griglia regolare, avente una maglia quadrata di 5x5m (vedere Figura 8.2). Tale maglia generata è stata inizialmente georeferenziata e successivamente quotata, grazie anche ai dati acquisiti dai rilievi post evento.



Figura 4.19 Rappresentazione grafica della area alluvionale simulata tramite FLO-2D, tramite una maglia 5x5m.

Le zone di innesco sono state determinate in accordo con quelle identificabili dalle ortofoto post-evento, ciò ha permesso di verificare peraltro che la colata si propagasse con un andamento simile a quello osservato durante l'evento del 1° ottobre 2009. Gli edifici sono stati valutati come elementi di ostruzione del flusso della colata, incapaci di immagazzinare sedimento.

Nel seguito si presentano i diversi casi analizzati differenziati tra loro per la tipologia di sedimento ipotizzata alla base della simulazione.

Scenario 1: ad elevata viscosità

Per il primo scenario di evento ipotizzato ad elevata viscosità, l'area dell'abitato interessata dal fenomeno delle colate detritiche generate all'interno dei bacini dei torrenti Sopra Urno, Puntale e Loco è delineata tramite un contorno rosso in Figura 4.20.

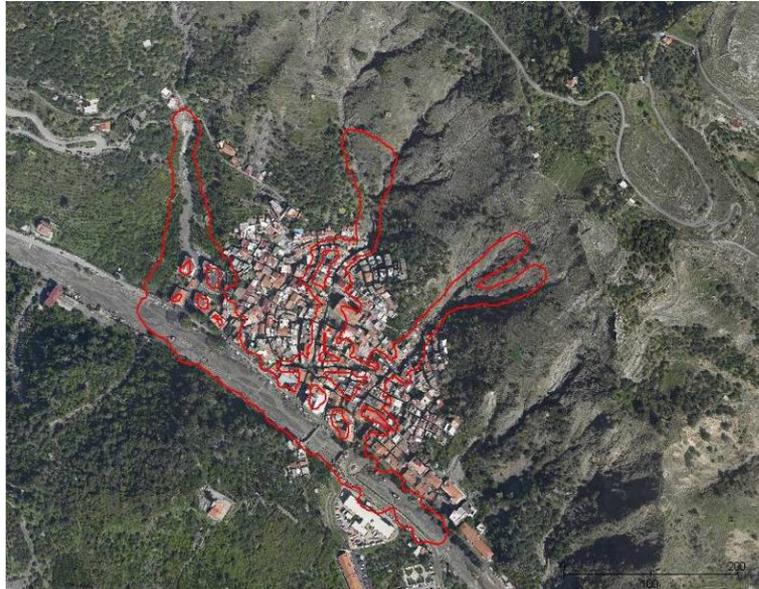


Figura 4.20 Rappresentazione grafica tramite contorno rosso dell'area interessata dai deflussi di colata detritica ottenuta dalla simulazione dello scenario di evento (caso 1).

La mappa di pericolosità ottenuta dalla simulazione, per mezzo del software FLO-2D, è riportata in Figura 4.21, dove:

- la fascia di colore rosso segnala le aree ad elevata pericolosità, in cui vengono riscontrate durante l'evento altezze di sedimento superiore ad 1m e pertanto le persone sono in pericolo sia dentro che fuori le proprie abitazioni e le strutture possono essere gravemente danneggiate a causa degli impatti violenti generati dalle colate;
- la fascia di colore arancione invece indica una condizione di rischio medio con altezze di sedimento minori di 1m. In questo caso le persone sono esposte a rischio soltanto se si trovano fuori dalle abitazioni, inoltre, a seconda delle caratteristiche strutturali, le abitazioni sono esposte a danni significativi;
- la pericolosità mappata in giallo è definita come bassa, ad essa infatti corrispondono livelli di sedimento da 0 a 0.5m, pertanto le persone sono esposte a basso o inesistente pericolo e gli edifici possono subire lievi

danni, consistenti per lo più in un minimo invasamento di materiale al loro interno.

La stessa mappa di pericolosità è riportata in Figura 4.22 utilizzando però come sfondo la zonazione redatta dai consulenti del commissario all'emergenza all'interno dell'O.P.C.M. 10 ottobre 2009, n. 3815. I livelli massimi di materiale detritico calcolati durante la simulazione vengono riportati in Figura 4.23. Si precisa che il livello di fango in metri è riferito alla quota del terreno locale. Infine in Figura 4.24 si riportano i livelli di fango ottenuti alla fine della simulazione, che consentono di stimare i livelli di materiale sedimentato.

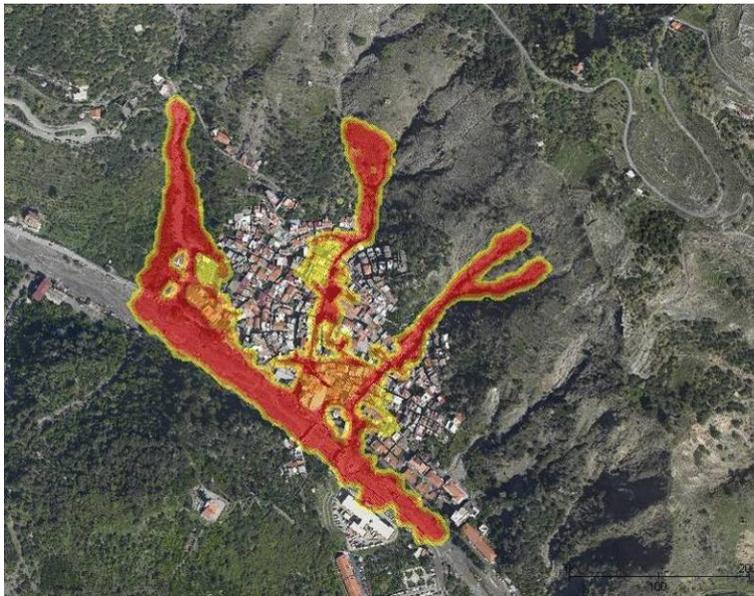


Figura 4.21 Rappresentazione grafica della mappa di pericolosità determinata tramite la simulazione dello scenario di evento (caso1).

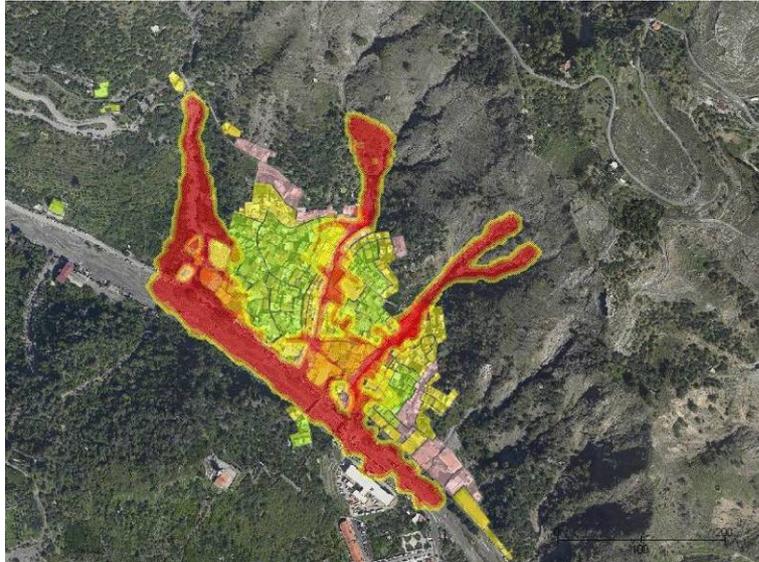


Figura 4.22 Rappresentazione grafica della mappa di pericolosità determinata tramite la simulazione dello scenario di evento, con lo sfondo la zonazione redatta dai consulenti del commissario all'emergenza all'interno dell'O.P.C.M. 10 ottobre 2009, n. 3815 (caso1).

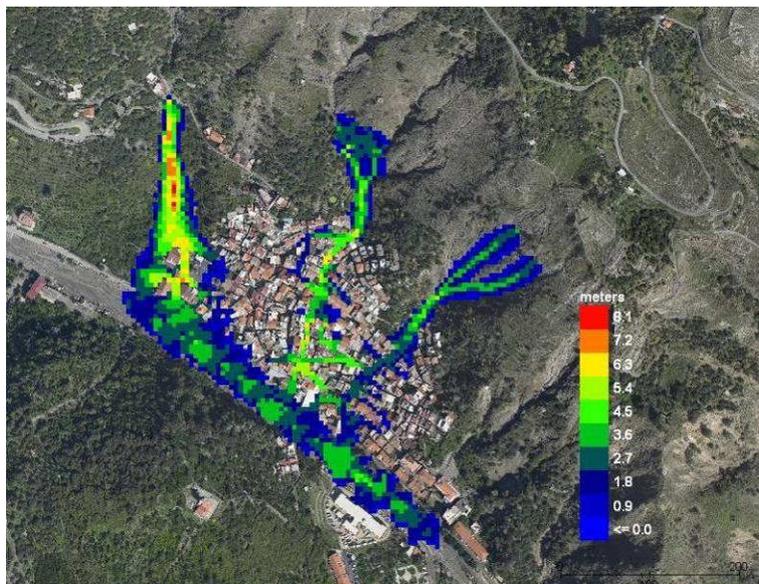


Figura 4.23 Distribuzione spaziale dei massimi livelli di tirante ottenuti durante la simulazione dello scenario di evento (caso1).

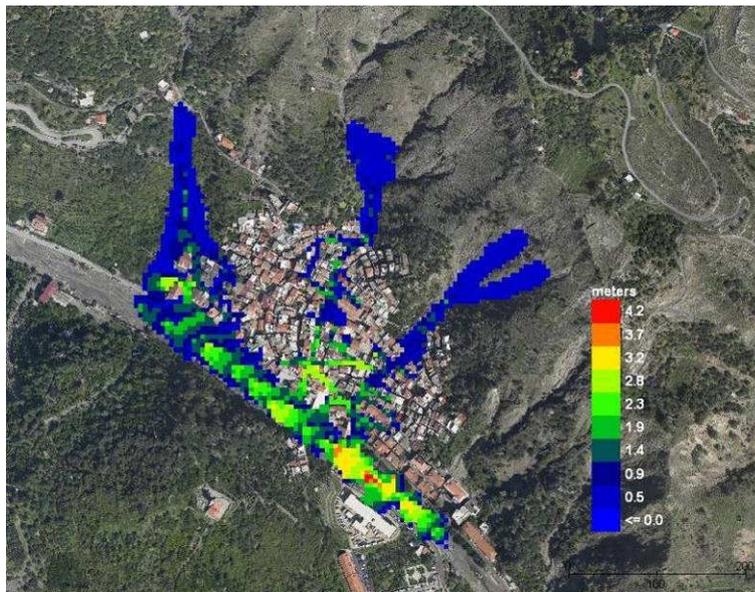


Figura 4.24 Distribuzione spaziale dei livelli di tirante ottenuti alla fine della simulazione dello scenario di evento (caso1).

Scenario 2: a media viscosità

Per il secondo scenario di evento ipotizzato caratterizzato da una media viscosità, l'area dell'abitato interessata dal fenomeno delle colate detritiche generate all'interno dei bacini dei torrenti Sopra Urno, Puntale e Loco è delineata tramite un contorno rosso in Figura 4.25. La mappa di pericolosità ottenuta dalla simulazione per mezzo del software FLO-2D è riportata in Figura 4.26, dove la differenziazione cromatica si riferisce agli stessi parametri adottati nella precedente ipotesi di evento. La stessa mappa di pericolosità è riportata in Figura 4.27 utilizzando però come sfondo la zonazione redatta dai consulenti del commissario all'emergenza all'interno dell'O.P.C.M. 10 ottobre 2009, n. 3815. I livelli massimi di materiale detritico calcolati durante la simulazione vengono riportati in Figura 4.28. Si precisa che, come per il caso precedente, il livello di fango in metri è riferito alla quota del terreno locale. Infine in Figura 4.29 si riportano i livelli di fango ottenuti alla fine della simulazione, che consentono di stimare i livelli di materiale sedimentato.

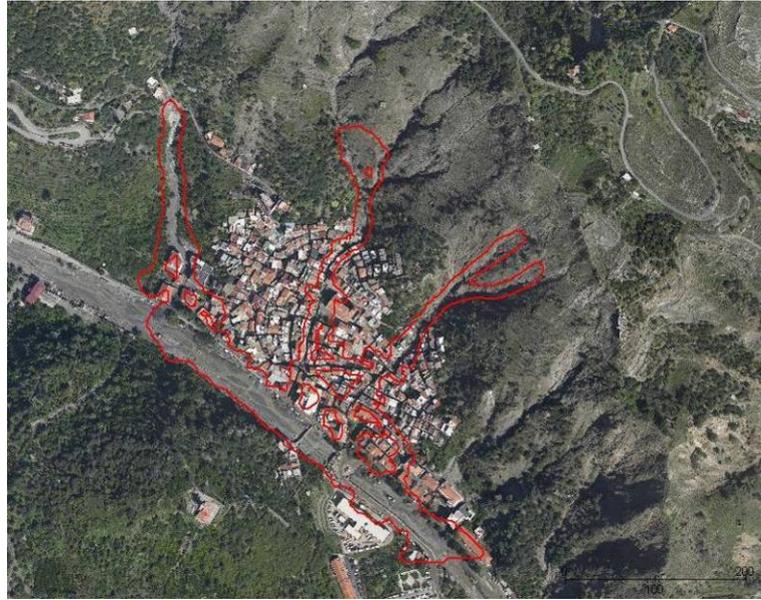


Figura 4.25 Rappresentazione grafica tramite contorno rosso dell'area interessata dai deflussi di colata detritica ottenuta dalla simulazione dello scenario di evento (caso2).

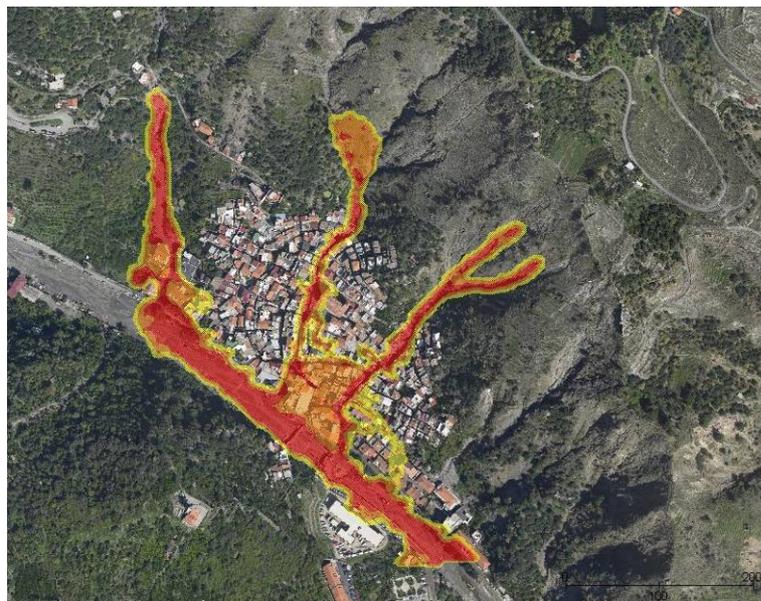


Figura 4.26 Rappresentazione grafica della mappa di pericolosità determinata tramite la simulazione dello scenario di evento (caso2).

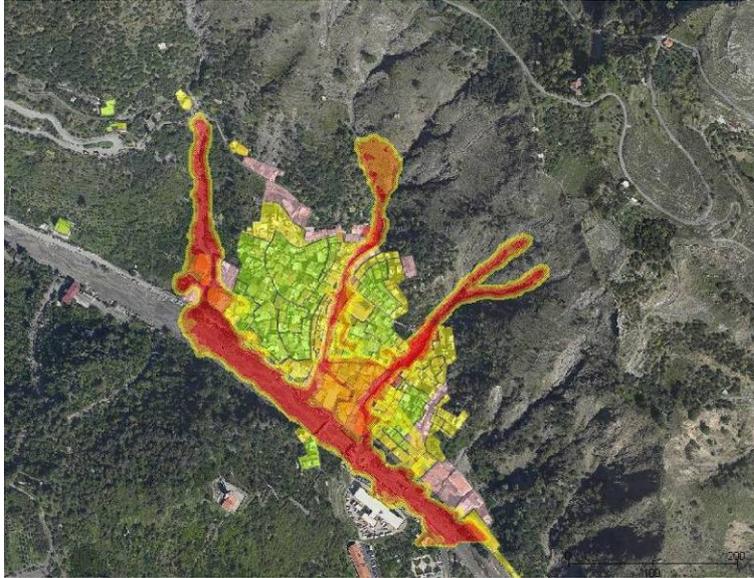


Figura 4.27 Rappresentazione grafica della mappa di pericolosità determinata tramite la simulazione dello scenario di evento, con lo sfondo la zonazione redatta dai consulenti del commissario all'emergenza all'interno dell'O.P.C.M. 10 ottobre 2009, n. 3815 (caso2).

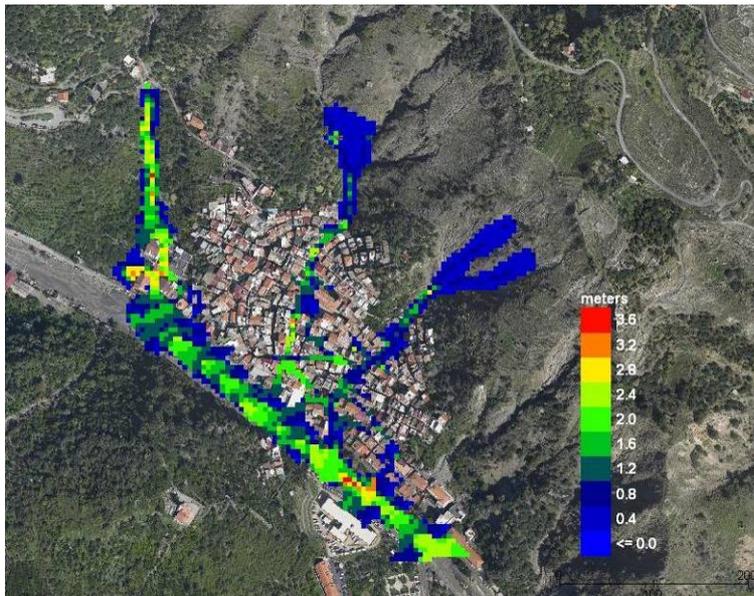


Figura 4.28 Distribuzione spaziale dei massimi livelli di tirante ottenuti durante la simulazione dello scenario di evento (caso2).

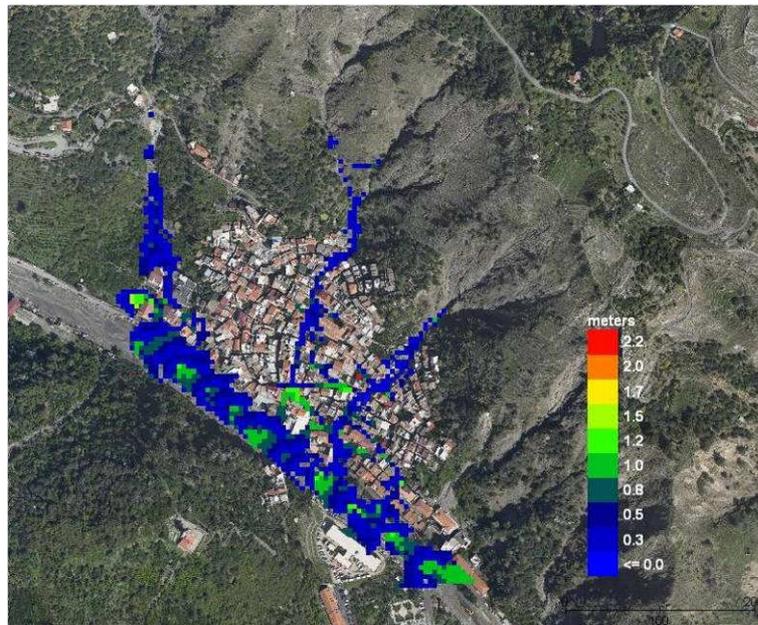


Figura 4.29 Distribuzione spaziale dei livelli di tirante ottenuti alla fine della simulazione dello scenario di evento (caso2).

Scenario 3: a bassa viscosità

Per il terzo scenario di evento ipotizzato caratterizzato da una bassa viscosità, l'area dell'abitato interessata dal fenomeno delle colate detritiche generate all'interno dei bacini dei torrenti Sopra Urno, Puntale e Loco è delineata tramite un contorno rosso in Figura 4.30. La mappa di pericolosità ottenuta dalla simulazione, per mezzo del software FLO-2D, è riportata in Figura 4.31, dove la differenziazione cromatica si riferisce agli stessi parametri adottati nella precedente ipotesi di evento. La stessa mappa di pericolosità è riportata in Figura 4.32 utilizzando però come sfondo la zonazione redatta dai consulenti del commissario all'emergenza all'interno dell'O.P.C.M. 10 ottobre 2009, n. 3815. I livelli massimi di materiale detritico calcolati durante la simulazione vengono riportati in Figura 4.33. Si precisa che, come per il caso precedente, il livello di fango in metri è riferito alla quota del terreno locale. Infine in Figura 4.34 si riportano i livelli di fango ottenuti alla fine della simulazione, che consentono di stimare i livelli di materiale sedimentato.

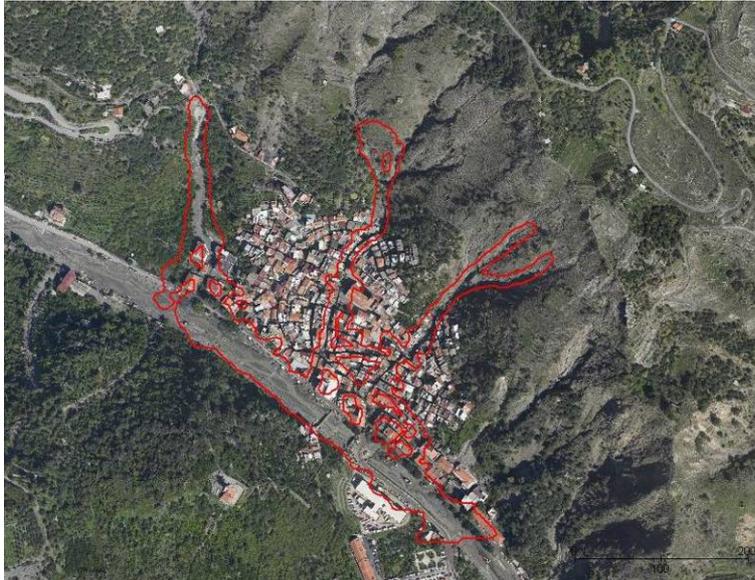


Figura 4.30 Rappresentazione grafica tramite contorno rosso dell'area interessata dai deflussi di colata detritica ottenuta dalla simulazione dello scenario di evento (caso3).

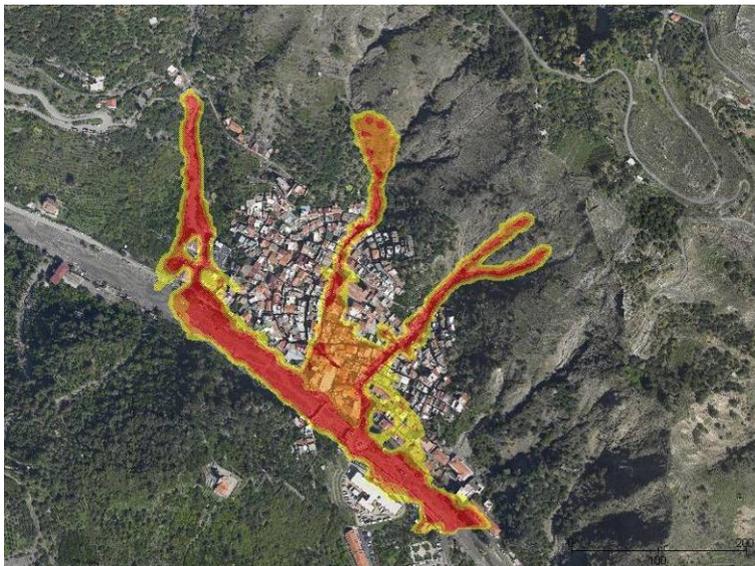


Figura 4.31 Rappresentazione grafica della mappa di pericolosità determinata tramite la simulazione dello scenario di evento (caso3).

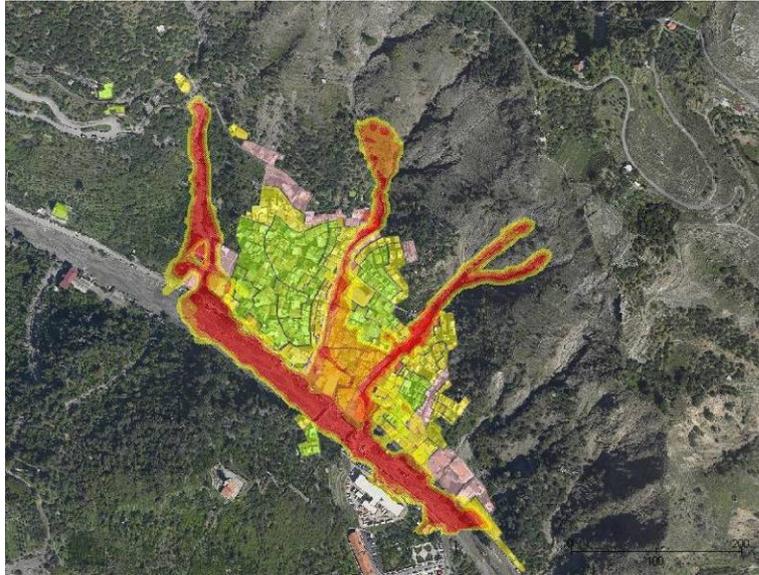


Figura 4.32 Rappresentazione grafica della mappa di pericolosità determinata tramite la simulazione dello scenario di evento, con lo sfondo la zonazione redatta dai consulenti del commissario all'emergenza all'interno dell'O.P.C.M. 10 ottobre 2009, n. 3815 (caso3).

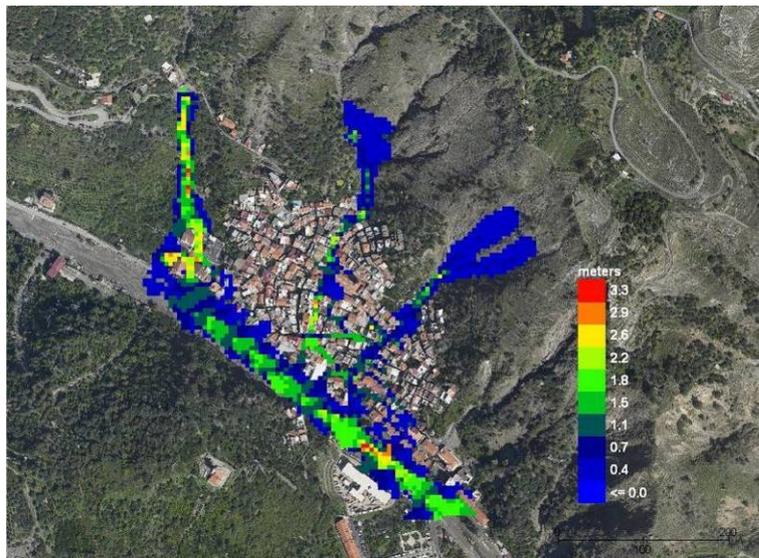


Figura 4.33 Distribuzione spaziale dei massimi livelli di tirante ottenuti durante la simulazione dello scenario di evento (caso3).

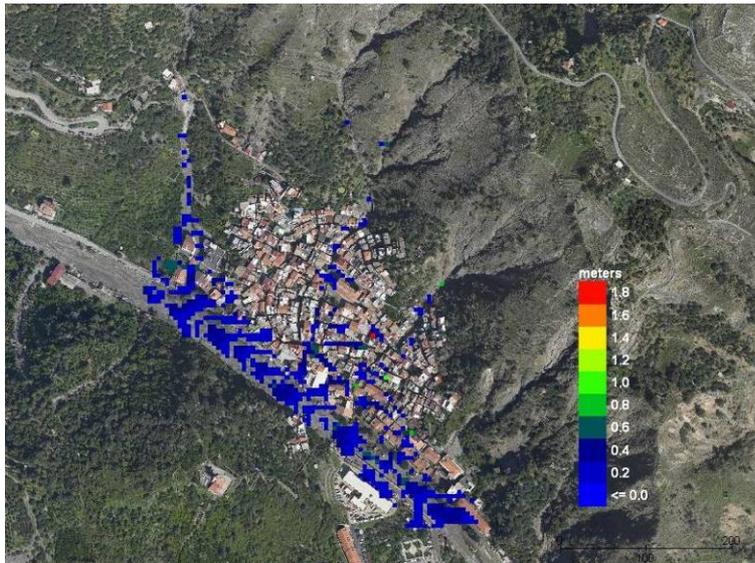


Figura 4.34 Distribuzione spaziale dei livelli di tirante ottenuti alla fine della simulazione dello scenario di evento (caso3).

Per quanto concerne l'analisi dei risultati appena presentati, preliminarmente preme osservare che la modellazione con FLO-2D risulta affetta da diverse approssimazioni, in particolare riguardo:

- alla conoscenza dell'orografia dei luoghi ed in particolare delle quote all'interno del centro abitato, in assenza di rilievi topografici di dettaglio;
- alla rappresentazione del modello digitale del terreno all'interno del modello, effettuata su una griglia di 5x5 m;
- alle ipotesi alla base della modellazione, che non sono in grado di cogliere alcuni fenomeni, come l'immagazzinamento di una porzione del materiale della colata detritico fangosa all'interno degli edifici.

Tenuto conto dei citati limiti, tuttavia, si segnala come le simulazioni effettuate al fine di caratterizzare la dinamica dell'evento del 1° ottobre 2009, in tutti e tre i casi esaminati, hanno evidenziato un considerevole deflusso di materiale detritico lungo i tre torrenti considerati, ed in particolare all'interno del centro abitato lungo la via Vallone e la via Chiesa, oltre ad uno sversamento di materiale detritico in alcune strade ad esse adiacenti. I risultati ottenuti per la simulazione caratterizzata da colate detritiche fangose a media viscosità sono, altresì, coerenti con quanto accaduto durante l'evento del 1° ottobre 2009, come peraltro confermato dal confronto tra i risultati stessi e la carta del rischio geomorfologico redatta da Ucosich in scala 1:1000 nelle settimane immediatamente successive al 1° ottobre 2009, per conto del Comune di Messina. In particolare, i livelli calcolati a fine simulazione e quelli segnalati da Ucosich come livelli dei sedimenti effettivamente sedimentati lungo le stesse vie sono abbastanza simili.

In Figura 4.35 si riporta uno stralcio della tavola redatta da Ucosich nel quale vengono indicate delle zone con differenti lettere alfabetiche : A, B,C,D, E, F e G. Per

queste zone si è effettuata, al fine di tarare al meglio il modello costruito con FLO-2D, un'analisi confrontando i risultati ottenuti per i tre casi simulati con quelli riscontrati nella tavola redatta da Ucosich. I risultati scaturiti dall'analisi vengono inoltre riportati in Tabella 4.I.

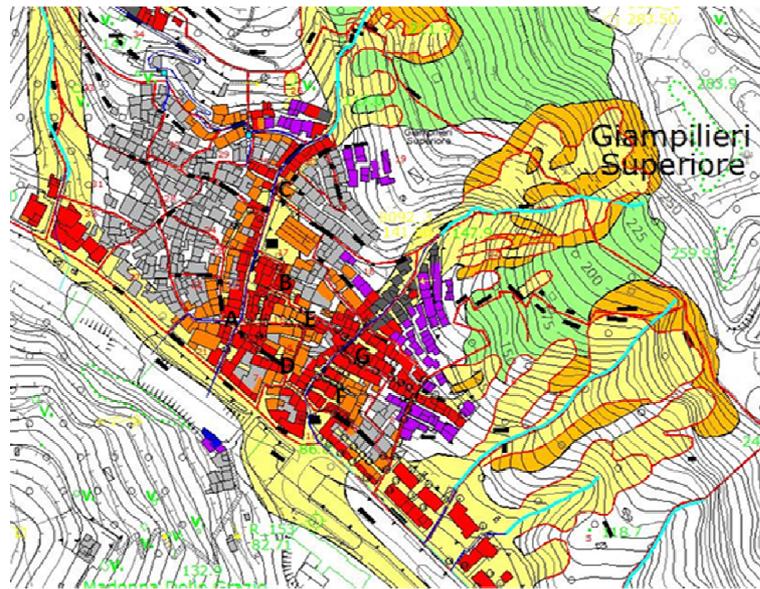


Figura 4.35 Estratto della carta redatta da Ucosich, contenente i livelli di invasamento all'interno dell'abitato di Giampileri Superiore.

Come del tutto preventivato, nel terzo caso durante la simulazione si evidenzia un deflusso più rapido e quindi soggetto a minori resistenze rispetto ai casi secondo e terzo, infatti dalla distribuzione spaziale dei spessori di tirante ottenuti alla fine della simulazione dello scenario di evento del terzo caso si evincono spessori bassi di materiale sedimentato.

Inoltre se si confrontano le aree di inondazione delineate durante lo sviluppo delle tre differenti simulazioni (Figura 8, Figura 13 e Figura 18) si evidenziano, come in Tabella 4.I, che i livelli di materiale sedimentato per la seconda simulazione sono maggiormente attinenti a quelli indicati nella tavola di Ucosich. Preme evidenziare che il riempimento dell'area in sinistra idraulica dell'incisione del torrente Puntale, viene solamente simulato per il secondo e il terzo, quindi per i casi caratterizzati da minore viscosità.

Tabella 4.I Valori dei livelli di colata detritica per le diverse zone, confrontando i dati relativi ai vari scenari di evento simulati con i dati di campo (Ucosich).

zona	caso1 [m]	caso 2 [m]	caso 3 [m]	Ucosich [m]
A	2.8	1.5	0.5	2
B	2.5	1.2	0.4	1.5
C	2.3	0.8	0.3	2
D	2.3	0.5	0.4	0.5
E	2.3	0.5	0.6	0.5
F	1.4	0.8	0.4	0.7
G	1.4	0.8	0.4	0.7

4.7 Simulazioni effettuate

4.7.1 Dati relativi alla geometria della zona alluvionale

I dati relativi alla geometria della zona alluvionale sono basati sulla cartografia post evento (scala 1:2000). La stessa griglia di calcolo, con celle quadrate di 1.5m x1.5m, è stata utilizzata per la simulazioni con entrambi i modelli.

La presenza di edifici all'interno della zona alluvionale è stata presa in considerazione per entrambi i modelli, ottenendo la stessa configurazione, sebbene la procedura di implementazione di questa funzione è risolta in maniera differente per i due modelli. Infatti, il FLO-2D considera la presenza di edifici assegnando un coefficiente di riduzione che tiene conto delle perdite di immagazzinamento del materiale all'interno della cella e inoltre del cambio di direzione del flusso di colata, mentre il TRENT-2D considera la presenza di edifici esclusivamente innalzando la quota della cella lungo la quale la polilinea di contorno dell'edificio ricade.

4.7.2 Modellazione effettuata tramite il FLO-2D

Per quanto concerne la modellazione effettuata tramite il codice di calcolo FLO-2D, essa ha necessitato in prima battuta la valutazione dei coefficienti empirici (equazioni 4 e 5). A causa della ipotesi di approccio reologico monofasico su cui il modello si basa, i parametri non possono essere direttamente valutati ma rimangono da stimare tramite l'applicazioni di processi di back analysis. In particolare i valori assunti si rifanno appunto a valori valutati tramite processi di back analysis che sono stati assunti esser pari a (Stancanelli et al., 2011):

- $\alpha_1=0.006032$; $\beta_1=19.9$; $\alpha_2=0.000707$; $\beta_2=29.8$

La ricostruzione dell'area di inondazione ottenuta dalle simulazioni effettuate è presentata in Figura 4.36, dove tale area è delineata da un contorno rosso. In particolare, è facile riconoscere la porzione di area urbanizzata interessata dai fenomeni di colate di

detrito che ben ripropone quella area effettivamente riscontrata anche da sopralluoghi effettuati sui luoghi dove l'evento alluvionale.

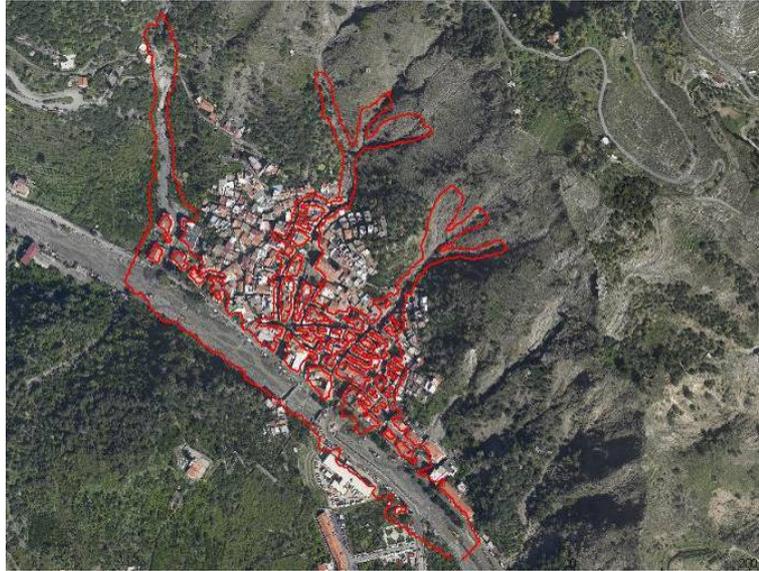


Figura 4.36 Aree di inondazione per lo scenario simulato con il FLO-2D.

Il massimo livello di colata ottenuto tramite le simulazioni effettuate con il FLO-2D vengono presentate in Figura 4.37. I maggiori livelli sono stati riscontrati per le colate di detrito generate lungo il bacino del torrente Sopra Urno, con un valore massimo di 6m.

In Figura 4.38 vengono presentate i livelli di colata riscontrati nella fase finale della simulazione (circa 3 ore dopo), che ripropongono i livelli di materiale sedimentato. In tal caso è importante notare che l'approccio monofasico non considera durante la propagazione della colata l'evoluzione del fondo, quindi casi di erosione o di deposito non vengono considerati rispetto a ciò che accade per la fase fluida.

L'intero ammasso di colata si ferma quando gli sforzi di attrito scendono al di sotto di una certa soglia legata alle proprietà del fluido.

Il valore maggiore del deposito è stato riscontrato lungo le strade adiacenti al percorso principale effettuato dalla colata, con un massimo valore riscontrato di 1.2m. Infine, i valori calcolati di velocità massime riscontrate sono mostrate in Figura 4.39. In tal caso è facile riconoscere che le velocità maggiori vengono riscontrate nelle parti sommitali dei bacini caratterizzate da elevate pendenze, con valori che variano in un intervallo di 10-20 m/s, mentre nella zona relativa all'abitato urbano vengono riscontrate velocità massime relative ad un range che varia da 1.5m/s a 5 m/s, sebbene alcuni valori isolati di 10 m/s sono stati osservati.

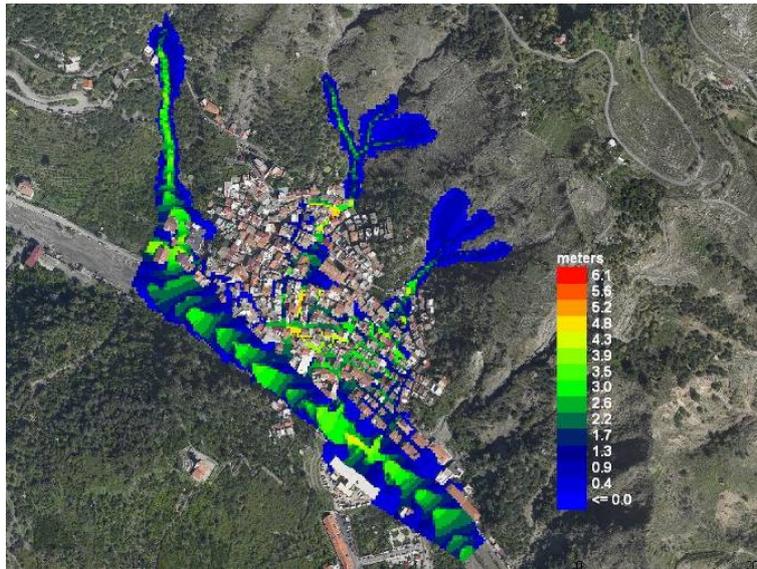


Figura 4.37 Livello massimo di colata osservato per lo scenario simulato con il FLO-2D.

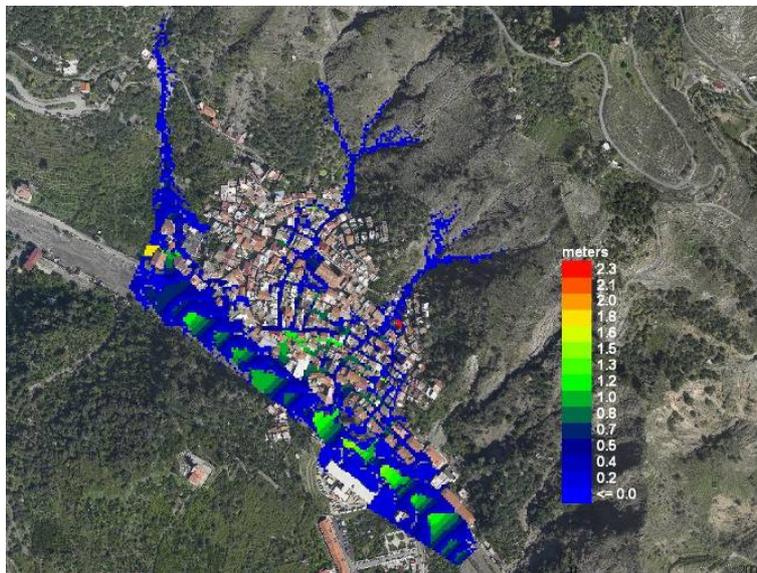


Figura 4.38 Livello finale di colata osservato per lo scenario simulato con il FLO-2D

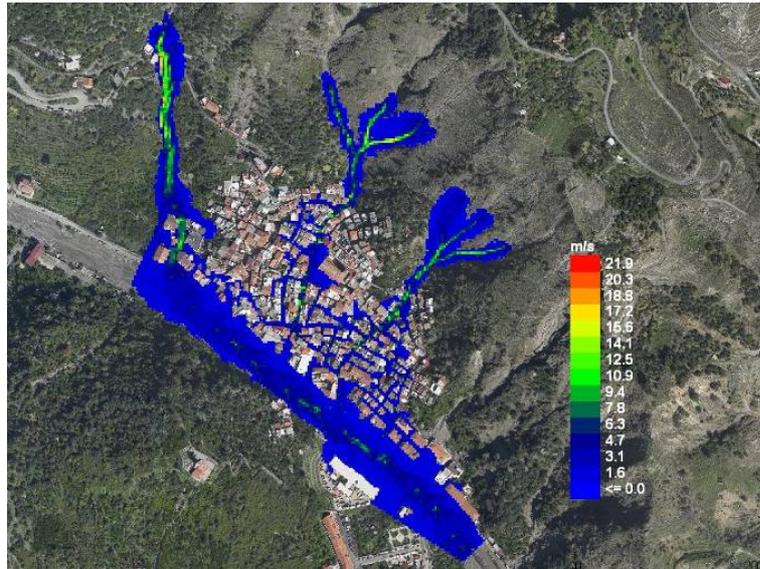


Figura 4.39 Velocità massime di colata osservate per lo scenario simulato con il FLO-2D.

4.7.1 Modellazione effettuata tramite il TRENT-2D

Per poter effettuare simulazioni con il codice TRENT-2D si è svolta una analisi iniziale per identificare i valori da attribuire ai parametri φ , Y e β relativi alla reologia della colata (equazioni 8-10). L'angolo di attrito interno che potrebbe esser determinato tramite analisi di laboratorio e analisi sui materiali riscontrati in situ, qui è stato assunto pari a 38° . Mentre per il parametro, esso è stato assunto pari a 10, considerando un valore medio della sua espressione nel campo di moto (EQ.9). Infine la capacità di trasporto è stata determinata come illustrato nel manuale del TRENT-2D (2011) e valori di ≈ 4.28 sono stati determinati.

I livelli massimi di colata detritica riscontrati durante la simulazione dell'evento sono mostrati in Figura 4.40. come è possibile notare, i valori sono generalmente minori di quelli predetti dal FLO-2D, pur avendo simulato il medesimo evento alluvionale. D'altra parte considerando gli spessori di materiale depositati alla fine della simulazione (Figura 4.41) il TRENT-2D riproduce livelli maggiori rispetto a quelli ricreati con il FLO-2D. In particolare, osservando il percorso principale effettuato dalla colata di detrito. Infine, le velocità massime rilevate dalle simulazioni effettuate con il TRENT-2D sono mostrate in Figura 4.42. Le velocità massime riscontrate sono minori rispetto a quelle ottenute dalle simulazioni effettuate con il FLO-2D, con velocità che variano in un intervallo 2-4m/s lungo i percorsi principali, mentre valori minori sono stati riscontrati lungo il percorso relativo alle strade adiacenti.

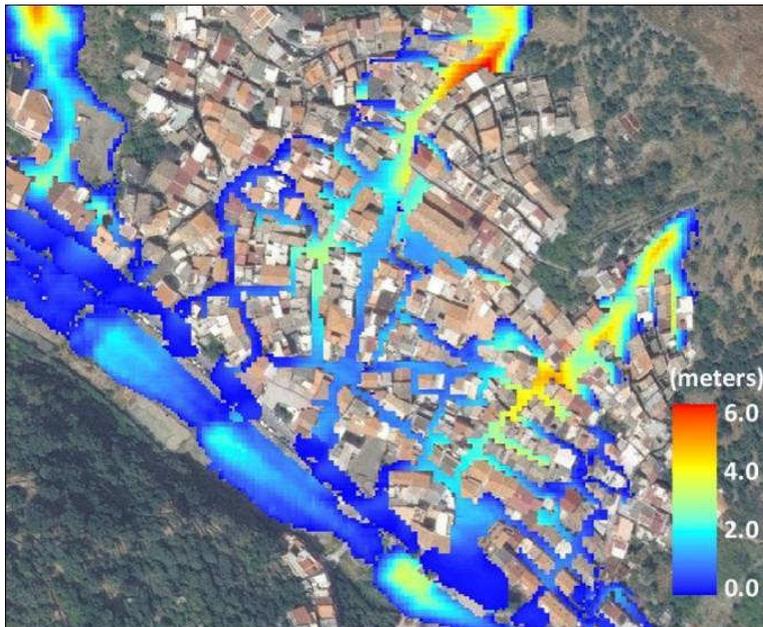


Figura 4.40 Livello massimo di colata osservato per lo scenario simulato con il TRENT-2D.

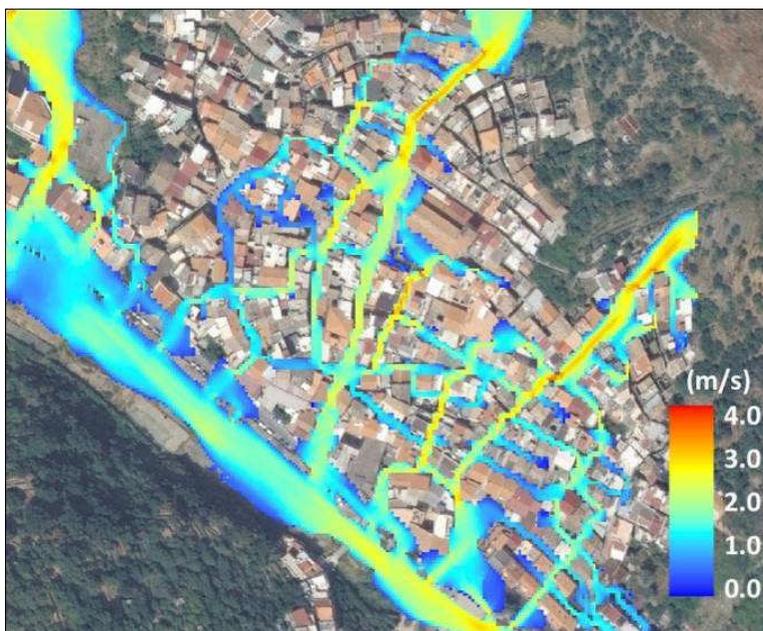


Figura 4.41 Livello finale di colata osservato per lo scenario simulato con il TRENT-2D

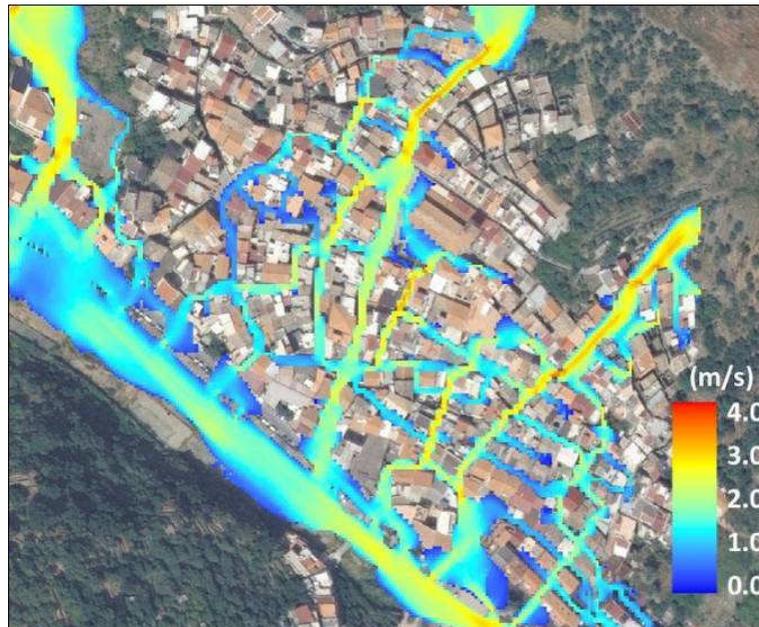


Figura 4.42 Velocità massime di colata osservate per lo scenario simulato con il TRENT-2D.

4.8 Validazione e confronto dei dati osservati durante gli scenari simulate e quelli riscontrati in situ.

I risultati ottenuti tramite il FLO-2D e il TRENT-2D sono qui di seguito paragonati con i dati provenienti da sopralluoghi effettuati in situ da chi scrive, da immagini video registrate durante l'evento e da misure dei livelli di materiale sedimentato.

In Figura 4.43 viene mostrata una ortofoto dell'abitato di Giampilieri dove sono indicati i vari punti dove le diverse informazioni sui i livelli sono disponibili.

In particolare, due rilevazioni di campo sono disponibili: i valori di massimo livello osservato durante l'evento (h_{max}) e i valori degli spessori di materiale sedimentato della colata di detrito (dz_b). In Tabella 4.II vengono riportate le misure effettuate nei punti per i quali sono disponibili i depositi.

Considerando il massimo valore di livello di colata detritica riscontrata (h_{max}), il codice FLO-2D predice valori in genere più elevati rispetto a quelli osservati. Questo può essere spiegato considerando il fatto che all'interno del codice citato gli edifici non sono capaci di immagazzinare materiale. Inoltre bisogna anche ricordare le notevoli incertezze relative alla magnitudo dell'evento. D'altra parte il codice TRENT-2D sottostima leggermente i dati osservati, sebbene mostri risultati più accurati lungo il percorso principale della colata e invece deviazioni maggiori nelle aree più periferiche rispetto al percorso della colata stessa.

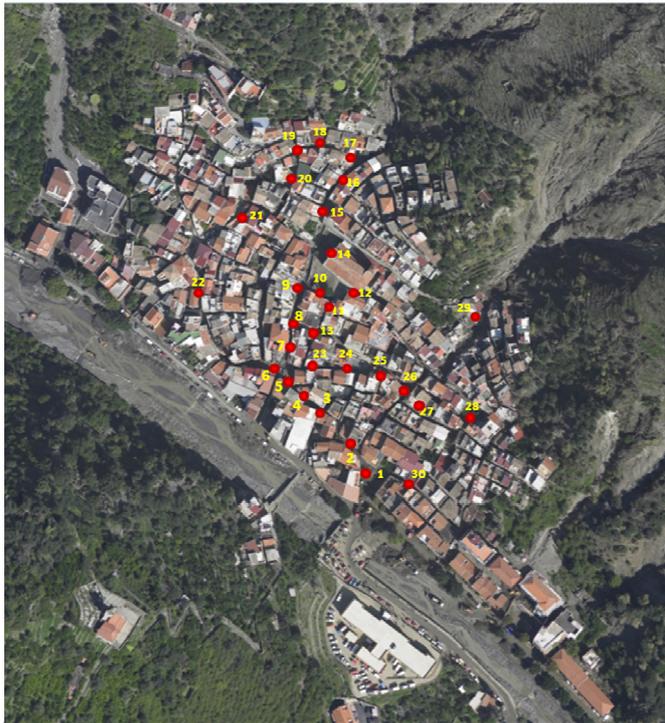


Figura 4.43 Ortofoto dell'abitato di Giampilieri dove sono indicati i vari punti dove le diverse informazioni sui i livelli sono disponibili.

Considerando i dati relativi agli spessori di materiale depositato (dz_b), può esser evidenziato il fatto che avendo assunto un approccio monofasico per il FLO-2D l'intera massa fluida si arresta quando gli attriti al fondo superano il determinato sforzo di soglia (o sforzo di Bingham), determinando così lo spessore finale di deposito (h_{final}). I valori ricavati dalle simulazioni effettuate tramite il FLO-2D sono minori rispetto a quelle ottenute tramite la carta redatta da Ucosich (2009), nella quale sono riportati i livelli rilevati sui luoghi dopo l'evento; la ragione può esser legata al valore di viscosità assunto oltre al fatto che elementi di disturbo (come la presenza di macchine lungo il percorso della colata) non sono stati considerati nello scenario simulato, sebbene detti elementi siano capaci di modificare in maniera sostanziale i deflussi. Considerando i risultati ottenuti dalle simulazioni con il TRENT-2D i livelli di materiale sedimentato sono anch'essi minori di quelli riscontrati in sito; e il medesimo fenomeno di sottostima dei livelli è stato riscontrato anche per i valori massimi di materiale osservato, sebbene essi risultino essere più accurati rispetto a quelli del FLO-2D, specialmente nei confronti dei livelli lungo il percorso principale.

Riguardo ai valori di massime velocità riscontrate non è stato possibile effettuare un confronto con dati di campo, in quanto non disponibili. Inoltre, per il FLO-2D i valori osservati variano tra 1.5 m/s fino ad 15 m/s, mentre per il TRENT-2D le velocità

sono minori lungo il percorso principale circa 2-4 m/s, mentre sono ancora minori nelle zone adiacenti. Tali differenze osservate tra i due modelli sono facilmente attribuibili alle differenti equazioni reologiche adottate.

Tabella 4.II Valori di massimo livello osservato durante l'evento (h_{\max}) e i valori degli spessori di materiale sedimentato della colata di detrito (dz_b), acquisiti sia tramite indagine in situ che tramite modellazione con il codice FLO- 2D e il codice TRENT-2D, in riferimento ai punti nei quali tali informazioni sono disponibili.

ESP. [no.]	DATI IN SITU		FLO-2D			TRENT2D		
	h_{\max} [m]	dz_b [m]	h_{\max} [m]	h_{final} [m]	v_{\max} [m/s]	h_{\max} [m]	dz_b [m]	v_{\max} [m/s]
1	2.4	2	1.41	0.40	3.15	1.8	1.48	1.53
2	1.75	1	2.74	0.78	1.43	1.67	1.46	1.77
3	1.5	1	3.86	0.92	2.39	1.27	0.85	1.02
4	1.7	1.5	4.37	1.12	4.11	1.20	0.98	1.14
5	2	2	4.52	1.12	4.31	1.63	1.44	1.8
6	3.3	2	4.50	1.12	4.43	2.18	1.74	1.29
11	2.83	2	1.76	0.06	5.73	1.50	0.03	1.50
13	2.05	1	1.99	0.69	1.72	1.86	0.85	2.52
15	1.26	2	2.45	0.21	3.15	1.96	1.89	2.13
23	2.04	0.5	2.28	0.46	1.38	1.47	0.34	1.50
24	2.78	0.5	2.13	0.35	0.58	1.91	0.52	0.93
25	2.3	1.2	2.17	0.35	1.21	1.95	1.1	2.34
26	1.93	1.8	2.09	0.05	3.21	2.05	1.98	2.19
27	1.95	1.2	3.98	1.01	1.13	1.80	1.12	1.32
28	5	0.4	2.81	0.10	2.47	1.01	0.24	1.17
30	2	1	1.7	0.68	0.90	1.40	0.57	0.84
Errore medio:			1.17	0.73	-	0.74	0.36	-

5. PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE DI UN MODELLO FISICO PER LO STUDIO DELLA PROPAGAZIONE E L'ARRESTO IN CONDIZIONE DI CONFLUENZA

5.1 Generalità

Il modello fisico è stato prima progettato e poi realizzato presso il Laboratorio di Idraulica e Costruzioni Idrauliche del Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale dell'Università degli Studi di Padova. L'apparato sperimentale è stato ideato prendendo idealmente spunto dal caso dell'alluvione di Giampilieri.

All'interno del presente capitolo vengono presentati al paragrafo 5.2 criteri adottati per la definizione della scala del modello fisico, e vengono definiti i parametri di scala determinati considerando come prototipo del modello il caso di Giampilieri. Al paragrafo 5.3 vengono descritti i criteri di progettazione e di realizzazione dell'apparato sperimentale. Successivamente al paragrafo 5.4 e al paragrafo 5.5 vengono descritti rispettivamente l'apparato strumentale e le caratteristiche del sedimento adottato per la sperimentazione. Gli strumenti di misura adottati per l'acquisizione dei dati di pressione, di tirante idrico della colata e dei depositi di colata vengono descritti al paragrafo 5.6. Mentre al paragrafo 5.7 viene esposta la procedura di laboratorio adottata per lo svolgimento delle prove sperimentali. Infine al paragrafo 5.8 vengono presentate in maniera sintetica le prove preliminari condotte.

5.2 Definizione della scala del modello fisico.

I modelli fisici vengono adottati quanto occorre indagare su fenomeni non facilmente schematizzabili matematicamente. L'adozione di questo tipo di modelli comporta sia costi più elevati rispetto a quelli previsti per i modelli matematici sia la disponibilità di laboratori provvisti di attrezzature e spazi adeguati.

Con particolare riferimento ai modelli fluviali, essi possono esser distinti in due categorie: modelli a fondo fisso e modelli a fondo mobile. Mentre i primi sono modelli in grado di restituire informazioni circa l'andamento del pelo libero relativamente a qualsiasi fenomeno idraulico, i secondi invece forniscono indicazioni sull'evoluzione del fondo, cioè sui processi connessi all'erosione o ai depositi che si realizzano. I modelli a fondo mobile si realizzano partendo da un modello a fondo fisso e successivamente sovrapponendo uno strato di materiale non coesivo con granulometria e peso specifico in rapporto di similitudine con quelli del prototipo.

Per la realizzazione di un modello fisico la prima operazione da effettuare è stabilire la scala di riduzione delle varie dimensioni geometriche:

$$\lambda = \frac{L_{\text{modello}}}{L_{\text{prototipo}}} \ll 1$$

Affinché si abbia una similitudine dinamica tra modello e prototipo, si dovrebbe avere l'eguaglianza di una serie di grandezze adimensionali quali: il numero di Froude, il numeri di Reynolds e il numero di Weber. Il primo rappresenta il rapporto tra forza di inerzia e di gravità:

$$\frac{M_a}{M_g} = \frac{\rho L^3 L/T^2}{\rho L^3 g} = \frac{V^2}{Lg} \rightarrow F_r = \frac{V}{\sqrt{Lg}}$$

il secondo tra forza di inerzia e quella viscosa:

$$\frac{M_a}{\tau A} = \frac{M_a}{\rho L^3 g} = \frac{\rho L^3 L/T^2}{\mu \frac{V}{L} L^2} \rightarrow R_e = \frac{\rho L V}{\mu}$$

il terzo tra forza di inerzia e forza dovuta alla tensione superficiale:

$$\frac{M_a}{\sigma L} = \frac{\rho L^3 L/T^2}{\sigma L} = \frac{\rho L^2 V^2}{\sigma L} \rightarrow W = \frac{\rho L V^2}{\mu \sigma}$$

Nella pratica, adottando nel modello lo stesso liquido del prototipo, risulta impossibile realizzare un modello che soddisfi contemporaneamente l'analogia di Froude, di Reynolds e di Weber; quindi in definitiva occorre privilegiarne una, individuando il parametro che maggiormente interessa.

Nei modelli fluviali si adotta l'analogia di Froude quando è importante investigare i fenomeni legati al carattere della corrente (veloce o lenta) e quindi preservare questa caratteristica sia nel modello che nel prototipo; viene scelta l'analogia di Reynolds quando si tratta di fenomeni in cui gli effetti della viscosità sono importanti e quindi quando si è in assenza di turbolenza molto sviluppata; mentre l'analogia di Weber viene scelta quando entrano in gioco i fenomeni influenzati dalla tensione superficiale, come nel caso del fenomeno dell'efflusso dagli stramazzi.

Nel caso in oggetto si è scelto di operare secondo la analogia di Froude. Pertanto, imponendo l'uguaglianza dei numeri di Froude per il prototipo e il modello, si ha:

$$F_{r_M}^2 = \frac{Q_M^2 b_M}{A_M^2 g} = F_{r_P}^2 = \frac{Q_P^2 b_P}{A_P^2 g}$$

si possono quindi ricavare le scale di riduzione delle altre grandezze fisiche:

$$\frac{V_M^2 b_M}{A_M^2 g} = \frac{V_P^2 b_P}{A_P^2 g} \rightarrow \lambda_v^2 = \left(\frac{V_M}{V_P} \right)^2 = \frac{A_M b_P}{A_P b_M} = \frac{\lambda_L^2}{\lambda_L} = \lambda_L$$

e quindi:

$$\lambda_v = \sqrt{\lambda_L} \text{ scala di riduzione delle velocità}$$

Con analogo procedimento si può trovare la scala di riduzione dei tempi:

$$\frac{V_M}{V_P} = \sqrt{\lambda_L} = \frac{L_M}{t_M} \frac{t_P}{L_P}; \quad \lambda_t = \frac{t_M}{t_P} = \frac{\lambda_L}{\sqrt{\lambda_L}}$$

$$\lambda_t = \sqrt{\lambda_L} \text{ scala di riduzione dei tempi}$$

Questo risultato è vantaggioso: infatti il modello deve funzionare un tempo minore al prototipo, per fornire gli stessi risultati.

Per la scala di riduzione delle portate si ha:

$$Q_M = A_M V_M \quad \text{e} \quad Q_P = A_P V_P$$

$$\lambda_Q = \frac{A_M}{A_P} = \frac{V_M}{V_P} \frac{Q_M}{Q_P} = \lambda_L^2 \lambda_L^{\frac{1}{2}} = \lambda_L^{\frac{5}{2}}$$

$$\lambda_Q = \lambda_L^{\frac{5}{2}} \quad \text{scala di riduzione delle portate}$$

Anche in questo caso si ha un enorme vantaggio, perché si deve alimentare il modello con una portata minore di quella del prototipo.

Il modello fisico realizzato all'interno del laboratorio di Idraulica di Padova si è ispirato al caso reale di Giampilieri, per cui qui di seguito vengono rappresentate le analisi effettuate ricorrendo ad una similitudine tra modello e prototipo in analogia di Froude.

Per quanto riguarda il canale principale nel modello, chiamato canale A, che dovrebbe essere equivalente al caso reale di Giampilieri al torrente Giampilieri, è possibile rilevare che la larghezza della sezione del canale in prossimità dell'abitato di Giampilieri è in media 35 m circa, mentre a scala di modello abbiamo un sezione di 0.5m, che definisce la scala di riduzione geometrica del modello essere 1:70. In tali condizioni risultano i seguenti rapporti di scala per le indicate grandezze fisiche (intesi come rapporti tra grandezze su modello e su prototipo):

- scala di riduzione geometrica	$\lambda_L = 1:70$
- scala di riduzione delle velocità	$\lambda_V = 1:8.37$
- scala di riduzione delle portate	$\lambda_Q = 1:40996.34$
- scala di riduzione dei tempi	$\lambda_t = 1:8.37$

È opportuno sottolineare come in realtà una certa portata Q_M possa defluire nel modello con infiniti profili liquidi, dipendenti dalla scabrezza del modello stesso; e di questi infiniti profili, uno soltanto è in similitudine con il profilo del prototipo secondo la scala λ_L delle grandezze geometriche. Quindi, se nel prototipo una portata Q_P defluisce in una certa sezione con un'altezza h_P , la portata deve defluire nel modello, nella corrispondente sezione, con un'altezza h_M e affinché ciò accada, occorre conferire al modello una opportuna scabrezza.

Indicando con R_m il raggio idraulico, si determina innanzi tutto la scabrezza del modello per via teorica, utilizzando la formula di Chezy:

$$\frac{V_M}{V_P} = \frac{\chi_M \sqrt{R_{mM} i_M}}{\chi_P \sqrt{R_{mP} i_P}} = \lambda_V = \sqrt{\lambda_L}$$

ed essendo nei modelli simili $i_M = i_P$:

$$\frac{\chi_M}{\chi_P} \sqrt{\lambda_L} = \lambda_V \quad \text{quindi} \quad \chi_M = \chi_P$$

Esprimendo χ mediante la formula di Gauckler-Strickler, si ha:

$$\frac{\chi_M}{\chi_P} = \frac{k_M}{k_P} \frac{R_{mM}^{\frac{1}{6}}}{R_{mP}^{\frac{1}{6}}} = 1$$

e quindi:

$$\lambda_K = \frac{k_M}{k_P} = \left(\frac{R_{mP}}{R_{mM}} \right)^{\frac{1}{6}} = \frac{1}{\lambda_L^{\frac{1}{6}}}$$

$$\lambda_K = \lambda_L^{-\frac{1}{6}} \text{ scala di riduzione del coefficiente K.}$$

Dalla equazione precedente si deduce che il modello deve avere una scabrezza molto minore rispetto al prototipo.

Per il caso in analisi al fine di valutare la verosimiglianza del modello ad una condizione reale come quella di Giampileri, si è effettuata una taratura del modello dove si è determinata la scabrezza del prototipo seguendo la seguente procedura. Si fa defluire una certa portata Q_M e si rilevano le altezze h_M di deflusso in due sezioni (B quella di monte e C quella di valle) posta a distanza Δs determinando la quota di variazione del pelo libero Δz .

Dai livelli idrici misurati, si ricavano tutte le grandezze geometriche e idrauliche delle due sezioni. In particolare, le quote assolute della linea dell'energia risultano rispettivamente:

$$E_A = z_A + \frac{v_A^2}{2g} \quad \text{e} \quad E_B = z_B + \frac{v_B^2}{2g}$$

La perdita di energia tra le due sezioni è quindi:

$$\Delta E = E_A - E_B = -i_H \Delta s$$

da cui si ricava la pendenza della linea dell'energia nel tratto analizzato Δs :

$$i_H = -\frac{\Delta E}{\Delta s}$$

Esprimendo i_H con la formula di Gaucker-Strickler:

$$Q_M = k_M R_M^{\frac{2}{3}} A (i_H)^{\frac{1}{2}}$$

in cui R_M rappresenta il raggio idraulico e A l'area liquida delle sezioni, essendo noto i_H dalla precedente formula di ricava K_m del tratto fluviale rappresentato dal modello.

Si può ora determinare quanto differiscono i numeri di Reynolds nel modello e nel prototipo, una volta che si realizzi l'analogia di Froude. Adoperando lo stesso liquido del prototipo, si ha quindi:

$$R_{eM} = \frac{V_M 4R_M}{\nu}$$

$$R_{eP} = \frac{V_P 4R_P}{\nu}$$

$$\frac{R_{eM}}{R_{eP}} = \frac{V_M R_M}{V_P R_P} = \sqrt{\lambda_L} \lambda_L$$

5.3 Criteri di progettazione del modello sperimentale

Il modello fisico è stato ideato traendo spunto dall'evento realmente accaduto durante la notte del 1 ottobre a Giampilieri Superiore (ME), già simulato numericamente all'interno del capitolo 4. A tal proposito si è voluta ricreare in maniera schematica la particolare configurazione di confluenza che caratterizza il centro abitato di Giampilieri (Figura 5.1).

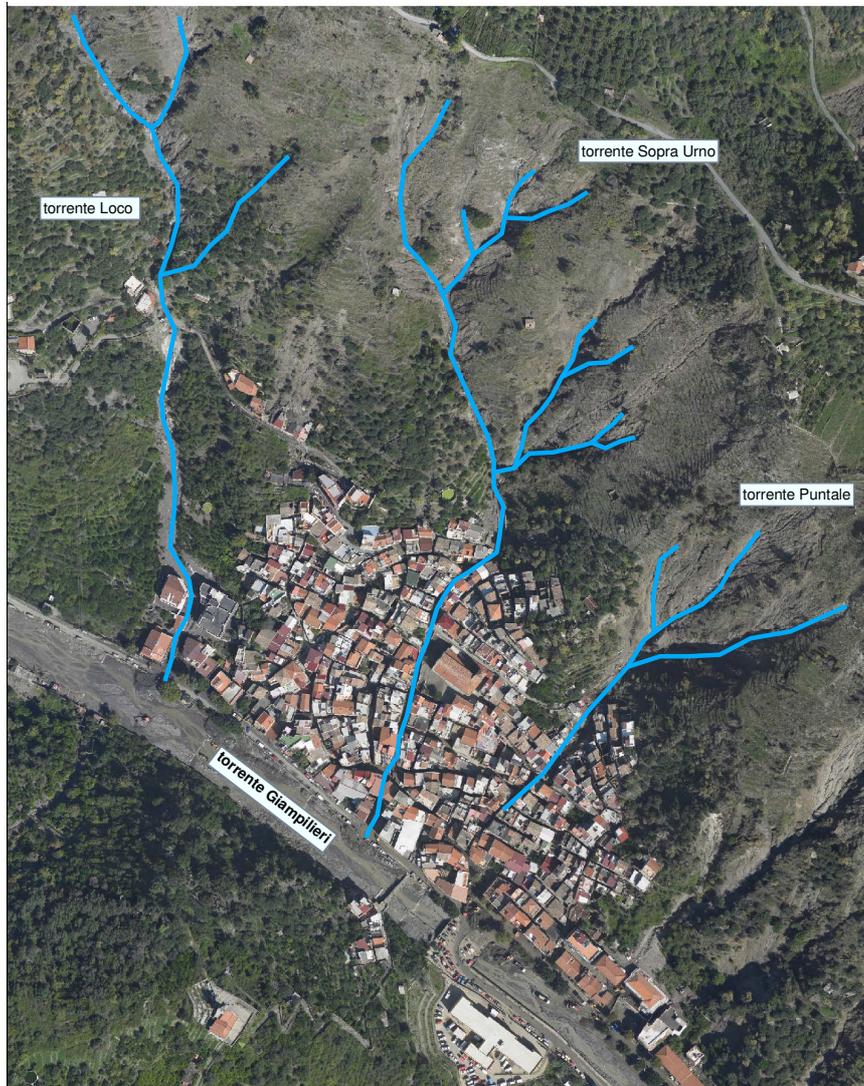


Figura 5.1 Condizioni di confluenze multiple tra i torrenti Loco, Sopra Urno e Puntale con il torrente Giampilieri collocati a ridosso dell'abitato di Giampilieri Superiore

Lo scopo della modellazione fisica è quello di investigare i fenomeni di colata detritica in condizione di confluenze multiple, condizioni non facilmente investigabili con la dovuta dovizia di particolari tramite i codici numerici prima applicati. In particolare, per mezzo del modello numerico si vuole analizzare l'influenza che alcuni parametri (i.e., l'angolo di confluenza, la pendenza delle canalette laterali e lo sfasamento degli istanti di innesco delle colate detritiche) esercitano sull'evoluzione e sull'arresto dei depositi che si realizzano nel corso d'acqua principale.

Il progetto dell'apparato sperimentale prevedeva la realizzazione di una doppia confluenza, schematizzata in Figura 5.2, che si compone di un canale principale, indicato in seguito come canale A, e di due canali laterali, di seguito indicati come canale B e canale C.

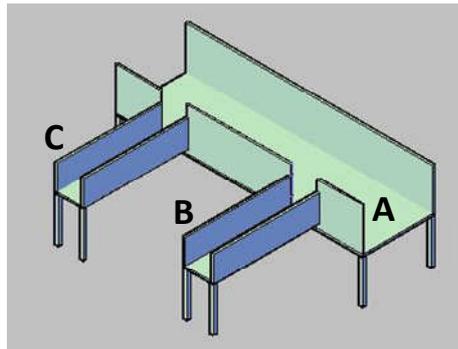


Figura 5.2 Schema tridimensionale del sistema di canalette da adottare durante la campagna: canale principale A, canali laterali B e C.

Il sistema è stato progettato in modo tale che le colate detritiche vengono generate e propagate all'interno dei canali B e C, e che il deflusso successivamente confluisca nel canale A posto più a valle.

Per poter realizzare un sistema di duplice confluenza all'interno del laboratorio di idraulica dell'Università di Padova si è sfruttato un canale già preesistente (Figura 5.3a), al quale si è pensato di inserire (Figura 5.3b) due canalette laterali realizzate in plexiglass.



Figura 5.3 Laboratorio di Idraulica di Padova: a) canaletta preesistente adottata come canale principale; b) canaletta preesistente con la

schematizzazione tramite solidi di color rosso delle due canalette confluenti.

Durante la fase di progettazione si è previsto che le canalette laterali (canale B e canale C) fossero dotate di una speciale cerniera, a più gradi di libertà, che consentisse la variazione sia dell'angolo di confluenza che della pendenza (Figura 5.4).



Figura 5.4 Particolare della cerniera di collegamento delle canalette laterali (canale B e canale C) alla canaletta principale (canale A), che consente la variazione dell'angolo di confluenza e della pendenza delle canalette laterali.

Inoltre si è progettato un sistema di alimentazione idrica (Figura 5.5) tale da consentire la regolazione della portata in ingresso alle due canalette laterali.



Figura 5.5 Sistema di alimentazione idrica che consente la regolazione della portata in ingresso alle due canalette laterali

Infine, per semplificare le operazioni preparatorie per lo svolgimento dell'esperimento si è progettato un sistema accoppiato di carro-ponte e paranchi per la movimentazione della ghiaia.

In Figura 5.6 si riporta un'immagine del carro-ponte e del paranco a cui è attaccata la benna utilizzata come contenitore per il ghiaio da movimentare. Le dimensioni della

benna sono state selezionate in modo che durante lo svolgimento l'esperimento venisse collocata all'estremità di valle del canale A per contenere il materiale che defluisce a valle del canale A.



Figura 5.6 Sistema carroponte e paranco a cui è attaccata la benna utilizzata come contenitore per il ghiaino da movimentare.

5.4 Apparato sperimentale

L'apparato sperimentale utilizzato per la campagna di laboratorio si trova presso il Laboratorio di Idraulica del Dipartimento di Ingegneria Civile Edile e Ambientale dell'Università degli Studi di Padova.

Le prove sperimentali sono state eseguite utilizzando un apparato appositamente realizzato (Figura 5.7).



Figura 5.7 Vista da valle della canaletta principale (canale A) e delle canalette laterali (canale B e C).

Il canale A è lungo 9 m, presenta una sezione rettangolare 50 cm x 70 cm ed è a inclinazione variabile. Le canalette laterali, entrambe a pendenza variabile, hanno la stessa geometria; esse, infatti, sono state realizzate con una lunghezza pari a 6 m e una sezione rettangolare di 30 cm x 30 cm.

A monte delle canalette laterali è stato realizzato un dispositivo di controllo e regolazione della portata che consente di saturare gradualmente gli ammassi granulari predisposti nelle canalette senza innescare indesiderate erosioni localizzate (Figura 5.8).

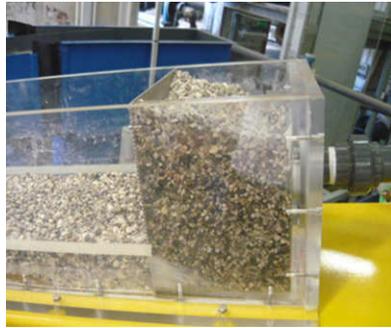


Figura 5.8 Dispositivo di controllo e regolazione della portata che consente di saturare gradualmente gli ammassi granulari

A valle, e precisamente nel punto di confluenza, le due canalette sono state opportunamente collegate alla canaletta principale (canale A) per favorire la possibilità di realizzare diversi angoli di confluenza evitando al contempo la fuoriuscita di acque e di sedimenti della colata (Figura 5.9).



Figura 5.9 Dispositivo di collegamento alla canaletta principale (canale A) che consente di variare l'angolo di confluenza evitando al contempo la fuoriuscita di acque e di sedimenti della colata.

Il fondo dei tre canali è rivestito con uno strato di ghiaia, fissato tramite una malta da edilizia, al fine di ricreare in ambiente di laboratorio una scabrezza simile a quella degli alvei naturali.

5.5 Descrizione delle caratteristiche del sedimento

La frazione solida della colata è costituita da ghiaietto a spigolo vivo le cui caratteristiche principali (range dei diametri d , diametro caratteristico d_{50} , peso specifico in condizione sature γ_s , porosità n , angolo d'attrito interno in condizioni sature φ_D e insature φ_S , deviazione standard σ e conducibilità idraulica K) sono riportate in Tabella 5.I.

Tabella 5.I Principali caratteristiche sedimentologiche del materiale impiegato per la frazione solida della colata.

diametro [mm]	d_{50} [mm]	γ_s [N/m ³]	n [-]	φ_D [°]	φ_S [°]	σ [°]	K [m/s]
2<d<5	3.9	17.440	0.43	48.6	43.3	0.5	0.001

La tipologia di materiale coinvolta è quindi un ghiaietto a spigolo vivo di 4 mm circa rappresentato in Figura 5.10.



Figura 5.10 Pezzatura del materiale adottato per la presente campagna sperimentale.

5.6 Strumenti di misura adottati

Il vantaggio principale derivante dalla scelta di condurre indagini basate sulla modellistica fisica rispetto agli altri metodi tradizionali, come la modellistica numerica o le analisi di campo, è rappresentata dalla possibilità di ottenere risultati in un ambiente in cui le forzanti che governano il fenomeno oggetto di studio possono essere controllate con grande accuratezza. Da qui i concetti di ripetibilità e riproducibilità di tutti gli esperimenti condotti.

Emerge quindi chiara l'esigenza di disporre di strumenti di misura che risultino quanto più possibile precisi, affidabili, di facile utilizzo e che non inducano perturbazioni significative al fenomeno investigato.

In particolare la strumentazione di acquisizione dati adottata per la campagna sperimentale qui presentata si compone di diversi strumenti utili per:

- la misura delle portate defluenti;

- la misura della pressione al fondo e del livello entrambi riferiti alla colata detritica;
- la sincronizzazione dati;
- il rilievo delle forme di deposito ottenute a fine esperimento
- l'acquisizione di video utili a conoscere lo svolgimento globale dell'esperimento.

Gli strumenti adottati sono: sei trasduttori di pressione, sei sonde ad ultrasuoni, due dataloggers, un micrometro di precisione e due telecamere.

La disposizione delle sonde di pressione, delle sonde di livello e delle telecamere, così come posizionate all'interno dell'apparato sperimentale, è rappresentata in maniera schematica in Figura 5.11.

In particolare si sono collocate in maniera accoppiata, per entrambe le canalette laterali, un trasduttore di pressione e un sensore di livello acustico nella sezione di misura collocata in prossimità dello sbocco nel canale A, precisamente a circa 15 cm dallo sbocco. L'accoppiamento del trasduttore di pressione e della sonda di livello acustica viene riproposto anche lungo il canale A nelle due sezioni di sbocco delle canalette laterali. Infine, le altre due sonde di livello acustiche sono state posizionate lungo il canale A entrambe a 75 cm circa a valle dalla sezione di sbocco delle canalette laterali.

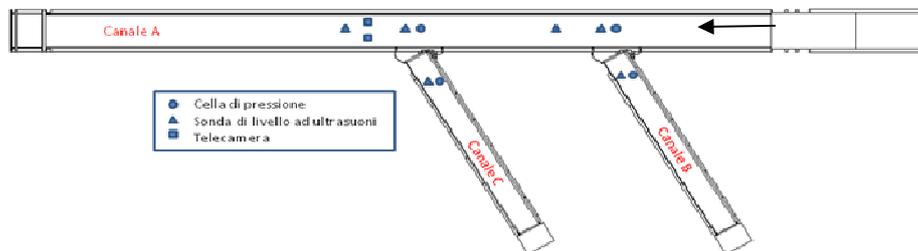


Figura 5.11 Vista dall'alto delle canalette con indicazione schematica del posizionamento delle celle di pressione e delle sonde di livello ad ultrasuoni e delle telecamere.

L'apparato sperimentale è dotato di diversi misuratori di portata che consentono di rilevare la portata defluente nel canale principale, la portata di saturazione dell'ammasso e la portata di innesco della colata nelle due canalette laterali. I misuratori di portata adottati sono sia di tipo più evoluto come i misuratori elettromagnetici impiegati per conoscere la portata di deflusso lungo il canale A e la portata di saturazione in ingresso alle due canalette laterali, sia da misuratori più tradizionali come i piezometri impiegati per la conoscenza delle portate di innesco dei fenomeni di colata lungo le canalette laterali. Per il funzionamento dei piezometri è stato necessario creare due diaframmi per i quali sono state condotte delle operazioni di taratura che hanno consentito di individuare le curve di calibrazione Δh - Q riportate in Figura 5.12.

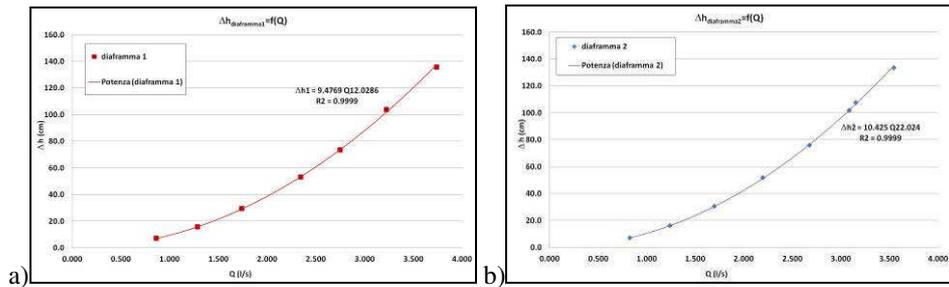


Figura 5.12 Curve di calibrazione relative ai due diaframmi posizionati: a) diaframma 1 per rilevare la portata defluente lungo il canale B, b) diaframma 2 per rilevare la portata defluente lungo il canale C.

Le sonde di livello a ultrasuoni adottate sono tutte prodotte dalla Pepperl+Fuchs, modello UC500-30GM-IUR2-V15, e presentano un range di misura tra 0 a 500 mm.

Le celle di pressione utilizzate sono delle celle miniaturizzate a membrana modello L09-Keller (Figura 5.13a), tarate per un campo di misura compreso tra 0 e 100 mbar. Lo schema di funzionamento delle celle di pressione a membrana adottate è riportata in Figura 5.13b. Inizialmente per consentire l'uso di tali sonde per la misura di campi di pressione indotti dal passaggio di una colata detritica è stato creato un opportuno alloggiamento affinché la cella di pressione non venisse danneggiata dal flusso della colata. Maggiori informazioni circa la tipologia di alloggiamento creata sono riportate al paragrafo 5.8 relativo alle prove preliminari.

Successivamente si è provveduto a stabilizzare il segnale elettrico in entrata al datalogger, tramite la costruzione di un ponte di Wheaston (Figura 5.13c) e utilizzando un cavo di connessione sonda-datalogger a coppie twistate e doppiamente schermato.

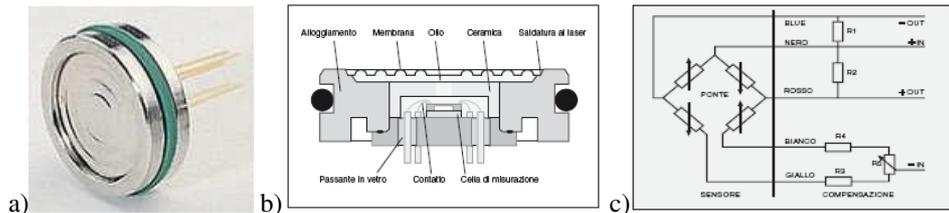


Figura 5.13 Informazioni relative alle celle di pressione adottate: a) modello L09 prodotto dalla Keller; b) schema di funzionamento della cella di pressione; c) schema elettrico adottato per la stabilizzazione del segnale.

Le sonde sono state tarate singolarmente considerando la cella di pressione a contatto diretto con livelli differenti di acqua, i risultati ottenuti hanno mostrato errori di misura al di sotto del mm. In particolare, sono state eseguite le prove di taratura condotte sono state effettuate tenendo conto dell'alloggiamento ricreato. Sono state individuate le curve di calibrazione relative ad ogni singolo trasduttore, che sono riportate in Figura 5.14, dove per ogni singolo trasduttore di pressione si riporta sia la retta di calibrazione fornita dalla casa produttrice (linea rosa) che la nuova retta

individuata (retta nera). Tutte le rette di calibrazione individuate risultano ben coerenti con quelle proposte dalla casa produttrice.

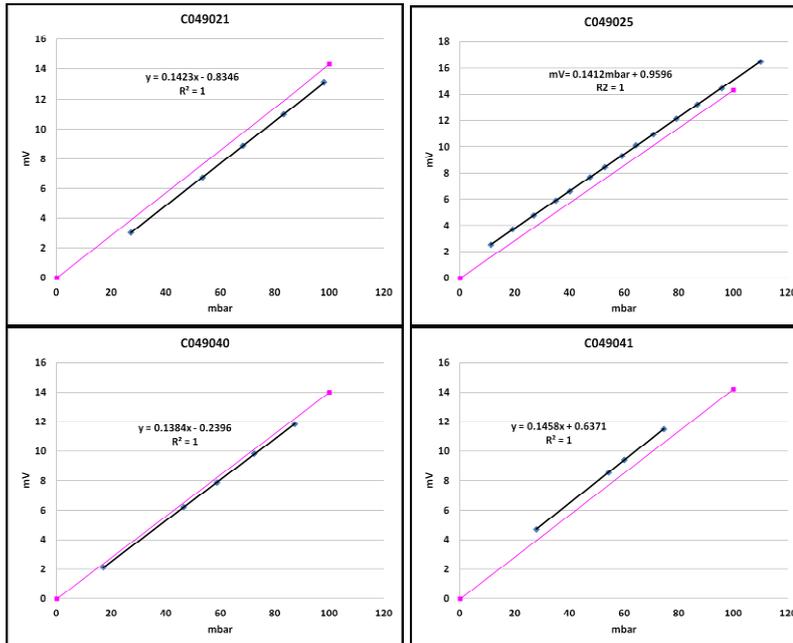


Figura 5.14 Rette di calibrazione relative alle quattro celle di pressione adottate. In rosa le rette di calibrazione fornite della casa produttrice e in nero le rette di calibrazione trovate considerando lo speciale alloggiamento costruito a protezione della sonda stessa.

Il segnale elettrico proveniente dalle differenti sonde installate è stato poi trasmesso e convertito in segnale analogico tramite due dataloggers della Campbell Scientific modello CR1000 (Figura 5.15a). Questi sono stati opportunamente sincronizzati attraverso il collegamento ad un PC (Figura 5.15b).

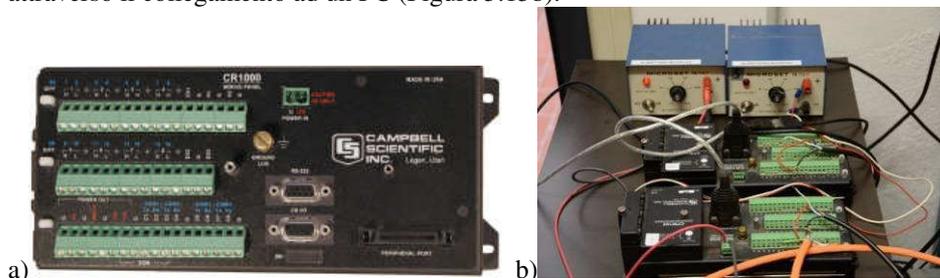


Figura 5.15 Dataloggers adottati durante la sperimentazione: a) modello Cr1000 della Campbell Scientific; b) connessioni dei due dataloggers al Pc e alle batterie di alimentazione.

In particolare sincronizzando gli orologi interni dei due strumenti con quello del PC. Inoltre, per la raccolta dei dati dal datalogger è stato adottato il software Loggernet, anch'esso prodotto dalla Campbell Scientific. Il software ha bisogno come dati di ingresso la mappa delle varie connessioni relative alle strumentazioni collegate al datalogger e le informazioni delle rette di calibrazione relative ad ogni strumento.

E' stato inoltre implementato un sistema di telecamere (Sony modello HXR-NX5E) al fine di registrare l'andamento complessivo dello svolgimento di ogni singola prova.

Per il rilievo delle forme di fondo si è adottato un micrometro di precisione.

5.7 Procedura sperimentale

La procedura sperimentale adottata per lo svolgimento delle prove di laboratorio si compone delle seguenti fasi di seguito descritte e schematizzate tramite il diagramma a blocchi in Figura 5.16. Preliminarmente si stabilisce la pendenza della canaletta A (mantenuta costante e pari a 5° in tutti gli esperimenti condotti). Successivamente si procede ad effettuare il riempimento delle due canalette laterali con il materiale granulare per uno strato di circa 10 cm. Quindi si fissa la geometria delle canalette laterali B e C stabilendone la pendenza e l'angolo di confluenza desiderati. E' opportuno segnalare che, sebbene detti parametri potrebbero essere selezionati differentemente per le due canalette, negli esperimenti che seguono detti parametri sono stati assunti allo stesso modo per entrambe.

Fissata la geometria dell'intero sistema, si passa alla calibrazione della strumentazione.

In seguito si effettua il rilievo del fondo della canaletta, in particolare della zona che verosimilmente interessata alla formazione del deposito (i primi 5 m di estensione lineare del canale A partendo da monte). Il rilievo viene effettuato tramite un micrometro di precisione.

Infine, la fase preparatoria si conclude con la sincronizzazione di tutte le strumentazioni di acquisizioni dati; e precisamente: delle celle di pressione, delle sonde di livello. Tale operazione di sincronizzazione viene effettuata tramite l'utilizzo di due datalogger connessi ad un unico pc i cui orologi interni sono stati sincronizzati con quello del pc medesimo.

Si passa quindi alla definizione dei parametri idrodinamici. Anzitutto, tramite un misuratore elettromagnetico di portata, si seleziona il deflusso idrico desiderato all'interno del canale A. Quindi si forniscono le portate di saturazione dell'ammasso granulare nelle due canalette laterali (canale B e C).

Successivamente si passa all'esperimento vero e proprio che consiste nell'innescare delle colate detritiche nelle due canalette laterali immettendo una portata impulsiva (circa 3l/s). Tale innesco viene effettuato prima in base dell'esperimento condotto prima nella canaletta di monte e poi in quella di valle o viceversa o in taluni casi si effettua l'innescare contemporaneo delle colate

generate lungo le due canalette.

Una volta che le colate detritiche generate si sono propagate e depositate nel canale A e che la portata defluente nello stesso canale A abbia smesso di influenzare la forma deposito, l'esperimento si considera concluso e pertanto si arresta l'acquisizione dei dati delle sonde e delle celle, nonché delle immagini delle due telecamere.

Arrestato il deflusso della portata nel canale principale, si effettua il rilievo del fondo per mezzo di un'asta graduata, al fine di acquisire la forma del deposito formatosi in condizioni drenate. Il rilievo viene effettuato per una estensione lineare di 5m partendo dalla sezione di monte, in particolare acquisendo dati di elevazione per sei differenti sezioni longitudinali del canale A con un intervallo di misura di 2cm.

Infine terminato l'esperimento il materiale depositato lungo il canale principale (canale A) viene trasportato all'estremità finale del canale A, dove è collocata una benna che verrà riempita con il ghiaio e movimentata per mezzo di un sistema-carroponte che in maniera del tutto automatizzata consenti di effettuare le operazioni di riempimento delle due canalette laterali necessario a condurre l'esperimento successivo.

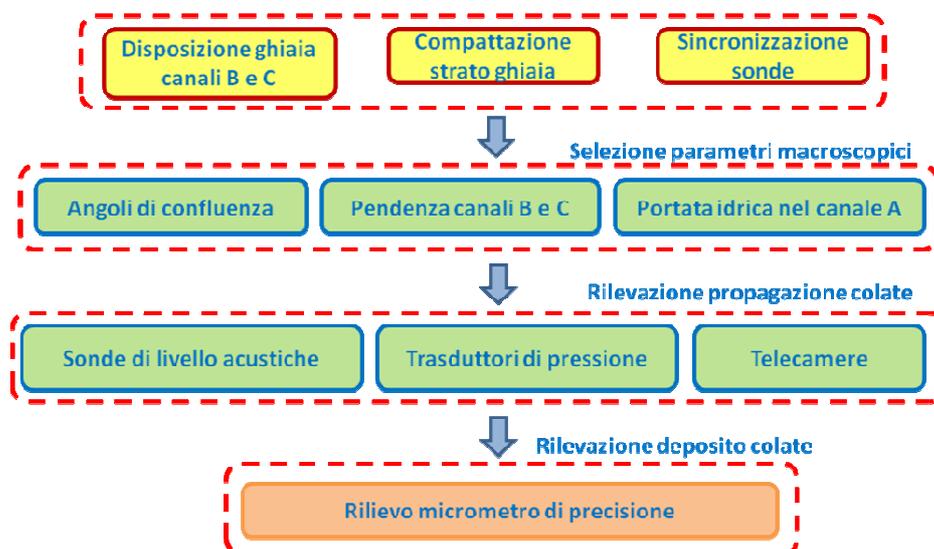


Figura 5.16 Diagramma a blocchi relativo alla procedura sperimentale adottata.

5.8 Prove preliminari

Le prove preliminari condotte hanno consentito di evidenziare alcuni limiti della strumentazione adottata ed inoltre sono state utili a trovare accorgimenti per l'ottimizzazione degli esperimenti successivi.

In particolare sono state condotte prove preliminari volte ad individuare la pendenza delle canalette laterali a cui si generavano debris flow di tipo maturo, cioè per

quei casi in cui si dà origine a colate con sedimento distribuito nell'intera profondità della corrente e con concentrazioni maggiori del 20%. Questi esperimenti sono stati utili ad individuare, compatibilmente alle caratteristiche dell'apparato strumentale a disposizione, le due configurazioni di pendenze delle canalette laterali, stabilite a 15° e 17°.

Ulteriori prove sperimentali sono state condotte per valutare la quantità di portata utile per innescare la colata detritica che si genera da un ammasso già in condizioni sature, la portata è stata individuata esser circa di 3l/s.

Infine altre prove preliminari sono state condotte per valutare la bontà della strumentazione di acquisizione dati adottata. In particolare è stata valutata l'adattabilità delle celle di pressione miniaturizzate per l'acquisizione dati di tirante delle colate detritiche. Effettuando i primi esperimenti si notava che quando la cella di pressione veniva sottoposta al passaggio della colata detritica, essendo la membrana esposta all'urto diretto del materiale granulare della colata, veniva danneggiata perdendo così di conseguenza i parametri di taratura iniziali. Per ovviare a tale problematica sono stati adottati alcuni accorgimenti. La cella di pressione è stata quindi ricoperta da uno strato di lana di vetro e da una sottile pellicola per renderla impermeabile. Lo strato di lana di vetro consente di non danneggiare la membrana per l'urto diretto dovuto al passaggio della colata, ma allo stesso tempo essendo un materiale facile a deformarsi consente di trasferire la pressione relativa all'impatto della colata alla sonda di pressione sottostante. Al fine di tener conto delle modifiche effettuate alla strumentazione le sonde così rivestite sono state tarate nuovamente.

6. ESPERIMENTI CONDOTTI

6.1 Generalità

La campagna sperimentale è stata condotta presso il Laboratorio di Idraulica dell'Università degli Studi di Padova, utilizzando l'apparato sperimentale e la strumentazione di acquisizione dati già state presentate al capitolo 5.

La campagna sperimentale condotta è composta da diciannove prove di laboratorio che sono state effettuate al variare dei seguenti parametri: angolo di confluenza (α) dei canali B e C, pendenza (β) dei canali B e C e tempistica di innesco. In particolare, per quanto riguarda la tempistica di innesco si sono considerate tre differenti configurazioni: fenomeno di colata che si propaga prima lungo il canale di monte (canale B) e dopo lungo il canale di valle (canale C) (B->C), fenomeno di colata che si propaga prima lungo il canale di valle (canale C) e dopo lungo il canale di monte (canale B) (C->B), fenomeno di colata che si propaga contemporaneamente lungo il canale di monte (canale B) e il canale di valle (canale C) (B=C).

In Tabella 6.I si riporta un quadro complessivo delle prove condotte dove sono riportati i parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e i parametri idraulici adottati: numero d'ordine della prova, inclinazione (β_A) e portata fluente (Q_A) nella canaletta principale, inclinazione (β) e angolo di confluenza (α) delle canalette laterali e gli istanti di innesco (t_0) delle colate, portata di innesco nelle canalette laterali.

Tabella 6.I Parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e parametri idraulici adottati per la campagna sperimentale: numero d'ordine della prova, inclinazione (β_A) e portata fluente (Q_A) nella canaletta principale, inclinazione (β) e angolo di confluenza (α) delle canalette laterali e gli istanti di innesco (t_0) delle colate, portata di innesco nelle canalette laterali.

N. exp.	canale A		canale B				canale C			
	β_A	Q_A [l/s]	β	α	t_0 [s]	Q_i [l/s]	β	α	t_0 [s]	Q_i [l/s]
1	5°	5	17°	60°	0	3.35	17°	60°	168	3.15
2	5°	5.16	17°	60°	176	3.35	17°	60°	0	3.15
3	5°	5.02	17°	60°	0	3.35	17°	60°	0	3.15
4	5°	5.18	17°	50°	0	3.35	17°	50°	175	3.15
5	5°	5.05	17°	50°	222	3.35	17°	50°	0	3.15
6	5°	5.13	17°	50°	0	3.35	17°	50°	0	3.15
7	5°	6	17°	50°	0	3.35	17°	50°	0	3.15
8	5°	5	15°	50°	0	3.35	15°	50°	210	3.15
9	5°	5	15°	50°	227	3.35	15°	50°	0	3.15
10	5°	5.08	15°	60°	0	2.83	15°	60°	0	2.78
11	5°	5.08	15°	60°	0	2.83	15°	60°	214	2.63
12	5°	5.02	15°	60°	219	2.84	15°	60°	0	2.7
13	5°	5	15°	50°	0	2.13	15°	50°	0	3
14	5°	5.08	15°	90°	0	2.88	15°	90°	0	2.1
15	5°	5.1	17°	90°	0	2.83	17°	90°	0	2.78
16	5°	5.08	17°	90°	0	3.05	17°	90°	235	2.91
17	5°	5.08	17°	90°	158	3.05	17°	90°	0	2.93
18	5°	5	15°	90°	0	3.05	15°	90°	206	2.95
19	5°	4.8	15°	90°	204	3.03	15°	90°	0	2.9

6.2 Esperimento 1 ($\alpha=60^\circ$, $\beta=17^\circ$, B->C)

L'esperimento no.1 è stato condotto seguendo la procedura sperimentale descritta al paragrafo 5.2. In Tabella 6.II sono riportati i parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e quelli idraulici di controllo. L'inclinazione della canaletta A è stata fissata a 5° e quelle delle canalette B e C a 17°. Lo strato di materiale posto lungo le canalette laterali presenta uno spessore pari a 10 cm circa; la portata di saturazione degli ammassi è pari a 0.78 l/s, valore strettamente dipendente dalla tipologia di materiale utilizzato e dallo spessore dell'ammasso.

Tabella 6.II Parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e parametri idraulici adottati nell'esperimento 1: numero d'ordine della prova, portata fluente nella canaletta principale, angolo di confluenza delle canalette laterali e istanti di innesco delle colate e portata di innesco nelle canalette laterali.

N. exp.	canaletta A	canaletta B			canaletta C		
	Portata [l/s]	Angolo di confluenza	t_0 innesco [s]	Portata di innesco [l/s]	Angolo di confluenza	t_0 innesco [s]	Portata di innesco [l/s]
1	5.00	60°	0	3.35	60°	168	3.15

Durante l'esperimento si sono innescati due differenti colate detritiche. Inizialmente si è innescata la colata lungo la canaletta di monte (canaletta B) e successivamente, dopo circa 3 minuti, si è innescata la colata nella canaletta a valle (Canale C).

In Figura 6.1, in Figura 6.2 e in Figura 6.3 vengono presentate alcune immagini acquisite alla fine dell'esperimento, in condizioni drenate. In particolare, dalla Figura 6.1a e dalla Figura 6.1b si evincono le forme di deposito allo stadio finale agli sbocchi delle canalette B e C e in fondo al canale A. In Figura 6.2a e in Figura 6.2b vengono rappresentate la quantità di materiale eroso durante l'esperimento lungo la canaletta laterale e la forma del deposito allo sbocco per la canaletta B; e in maniera analoga in Figura 6.3a e in Figura 6.3b per la canaletta C.

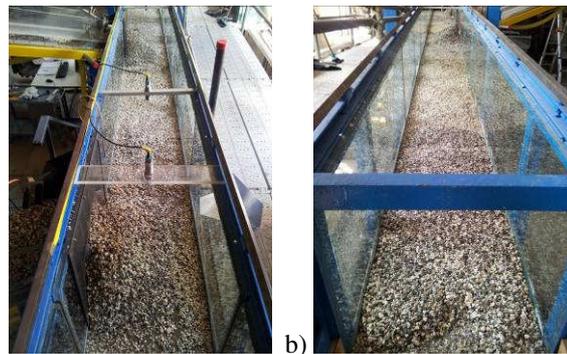


Figura 6.1 Depositi lungo la canaletta A in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.1 ad esperimento concluso: a) vista generale; b) vista della zona valliva.

Da queste immagini si osservano i fenomeni di deposito a valle delle canalette B e C: si evidenzia, in particolare, la debole interazione tra i fenomeni di deposito, condizione resa evidente in Figura 6.1a dove si nota chiaramente come l'erosione del deposito a valle della canaletta B non abbia interagito con il deposito della canaletta C. Anche se la portata defluente lungo il canale A ha comunque effettuato una azione erosiva e di trasporto del materiale eroso e pervenuto lungo le canalette B e C, tanto è vero che a valle si sono riscontrati importati depositi di materiale (vedi Figura 6.1b).

Inoltre appare opportuno far notare come il fenomeno di colata innescato nel canale B non abbia coinvolto tutto il materiale a disposizione. Infatti si vede come sia rimasto parte del materiale nella zona valliva della canaletta (Figura 6.2a), mentre per la canaletta C il materiale a disposizione è stato coinvolto nella sua globalità dal fenomeno di colata (Figura 6.3a).



Figura 6.2 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.1 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta B; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta B.



Figura 6.3 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.1 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta C; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta C.

La ricostruzione dei depositi nella canaletta A ottenuta per mezzo di rilievi effettuati con asta graduata viene riportata in Figura 6.4. Anche in questo caso la scarsa interazione tra i depositi che la maggiore estensione e il maggiore volume del deposito allo sbocco della canaletta C rispetto a quello formatosi allo sbocco della canaletta B.

Dal confronto delle immagini (Figura 6.1a) e del rilievo effettuato (Figura 6.4) è subito evidente come il deposito a valle della canaletta C sia maggiormente esteso sia a monte che a valle rispetto a quello della canaletta B.

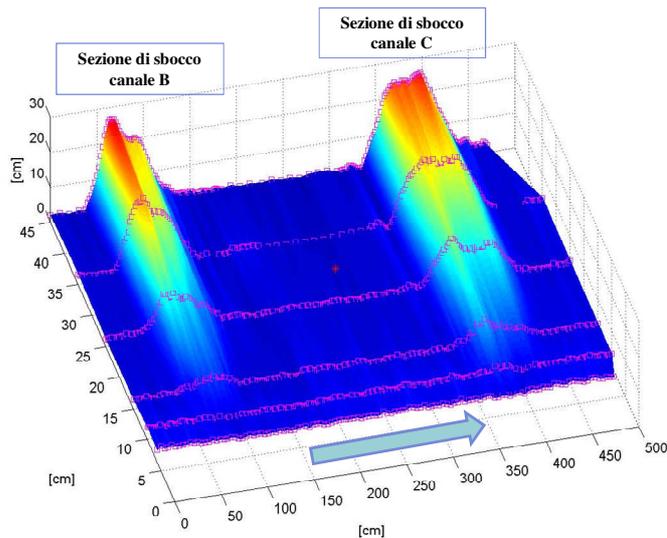


Figura 6.4 Ricostruzione tridimensionale dei depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.1, dove la freccia indica la direzione della portata defluente lungo il canale A.

Si sono acquisiti dati grazie all'utilizzo di sensori di livello acustici e di celle di pressione, posizionati in prossimità delle canalette B e C come descritto nel paragrafo 5.6. In Figura 6.5 e in Figura 6.6 si riportano gli andamenti della variazione della pressione e del livello nel tempo entrambi registrati in funzione della propagazione del fenomeno di colata.

La Figura 6.5a e la Figura 6.5c illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 1 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta A, in prossimità dello sbocco della canaletta B. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 50 cm. L'accoppiamento tra la sonda di livello e la cella di pressione consente di cogliere alcuni interessanti aspetti della dinamica che caratterizza l'evoluzione e il deposito della colata. L'andamento del grafico in Figura 6.5a indica che, a circa 230 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, della durata di circa 330 s. Tale fenomeno è verosimilmente attribuibile all'aumento di portata nel canale principale (A) dovuto al contributo della portata di saturazione che filtra attraverso l'ammasso detritico inizialmente collocato nella canaletta C. Tale fenomeno invece viene avvertito dalla sonda di livello accoppiata con un leggero andamento ondulatorio (vedi Figura 6.5c). L'inizio del deposito dei sedimenti convogliati dalla colata detritica, generata lungo la canaletta B, si realizza attorno ai 520s. Nell'intervallo di tempo tra 520 s e 980 s si osserva un comportamento intermittente del deposito, verosimilmente legato all'alternarsi di fasi di accrescimento e parziale erosione. In tale intervallo di tempo si registra un notevole innalzamento dei valori acquisiti sia dalla cella di pressione che

dalla sonda di livello. In particolare, la cella di pressione evidenzia, l'impatto dinamico della colata detritica sul fondo durante la fase di progressivo accrescimento del deposito (individuato dai picchi di pressione registrati a 550 s e 570 s). Infine nell'intervallo compreso tra i 970 s e la fine della prova, la pressione al fondo e il livello della superficie subiscono un abbassamento verosimilmente attribuibili al drenaggio dell'ammasso.

La Figura 6.5b e la Figura 6.5d illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 1 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta B, in prossimità dello sbocco. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 20 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.5b indica che, a circa 400 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, verosimilmente attribuibile all'erogazione della portata di saturazione. Mentre in Figura 6.5d si registra che la propagazione della colata viene registrata nella sezione di misura nell'arco temporale compreso tra 520 s e 620 s. Infine nell'intervallo compreso tra i 620 s e la fine della prova, la pressione al fondo e il livello della superficie subiscono un abbassamento verosimilmente attribuibili all'arresto dell'erogazione di portata lungo il canale B.

La Figura 6.5e illustra l'andamento della sonda di livello posta lungo il canale A a 75 cm circa a valle dello sbocco con la canaletta B. Si registra anche in questo caso che a 200 s circa dall'inizio dell'acquisizione dati un aumento di livello conseguente all'inizio del deflusso idrico lungo il canale A, e successivamente un aumento di livello, anche se di entità modesta, nell'intervallo temporale compreso tra 520s e 620 s al trasporto solido conseguente all'erosione del materiale depositato più a monte. Anche in questo caso a 970 s si registra un abbassamento di livello dovuto all'arresto del deflusso idrico lungo il canale A.

La Figura 6.6a e la Figura 6.6c illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta A, in prossimità dello sbocco della canaletta C. Analogamente a quanto descritto per la canaletta B, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 50 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.6a indica che, a circa 230 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, fenomeno conseguente all'inizio del deflusso idrico nel canale A. A 520 s dall'inizio dell'acquisizione dati si registra un picco, verosimilmente attribuibile all'aumento di portata nel canale principale (A) dovuto al contributo della portata di saturazione che filtra attraverso l'ammasso detritico inizialmente collocato nella canaletta C; fenomeno che viene avvertito dalla sonda di livello accoppiata con un leggero andamento ondulatorio (vedi Figura 4c). L'inizio del deposito dei sedimenti convogliati dalla colata detritica, generata lungo la canaletta C, si realizza attorno ai 700s. Nell'intervallo di tempo tra 700 s e 780 s si osserva un notevole innalzamento dei valori acquisiti sia dalla cella di pressione che dalla sonda di livello, fenomeno conseguente al passaggio dell'onda di piena. Infine nell'intervallo compreso tra i 780 s e la fine della prova, la pressione al fondo e il livello della superficie subiscono un abbassamento verosimilmente attribuibili al drenaggio dell'ammasso.

La Figura 6.6b e la Figura 6.6d illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 1 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta C, in prossimità dello sbocco. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 20 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.4b indica che, a circa 670 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, verosimilmente attribuibile all'erogazione della portata di saturazione. Mentre in Figura 6.6d si registra che la propagazione della colata viene registrata nella sezione di misura nell'arco temporale compreso tra 670 s e 730 s. Infine nell'intervallo compreso tra i 730 s e la fine della prova, la pressione al fondo e il livello della superficie subiscono un abbassamento verosimilmente attribuibili all'arresto di erogazione di portata lungo il canale C.

La Figura 6.6e illustra l'andamento della sonda di livello posta lungo il canale A a 75 cm circa a valle dello sbocco con la canaletta C. Si registra anche in questo caso, a 230 s circa dall'inizio dell'acquisizione dati, un aumento di livello conseguente all'inizio del deflusso idrico lungo il canale A, e successivamente un aumento di livello, anche se di entità modesta, nell'intervallo temporale compreso tra 220s e 980 s al trasporto solido conseguente all'erosione del materiale depositato più a monte. Anche in questo caso per tempi superiore ai 980 s si registra un abbassamento di livello dovuto all'arresto del deflusso idrico lungo il canale A.

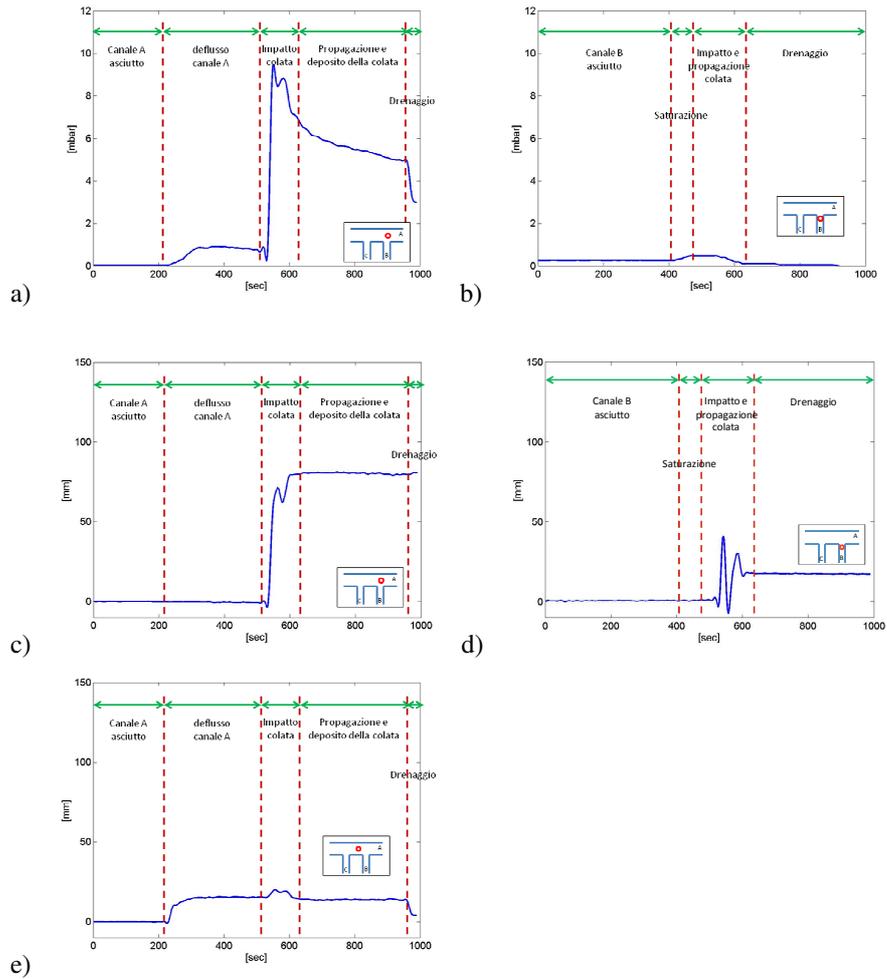


Figura 6.5

Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta B nel canale principale durante la prova 1: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta B; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta B; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.

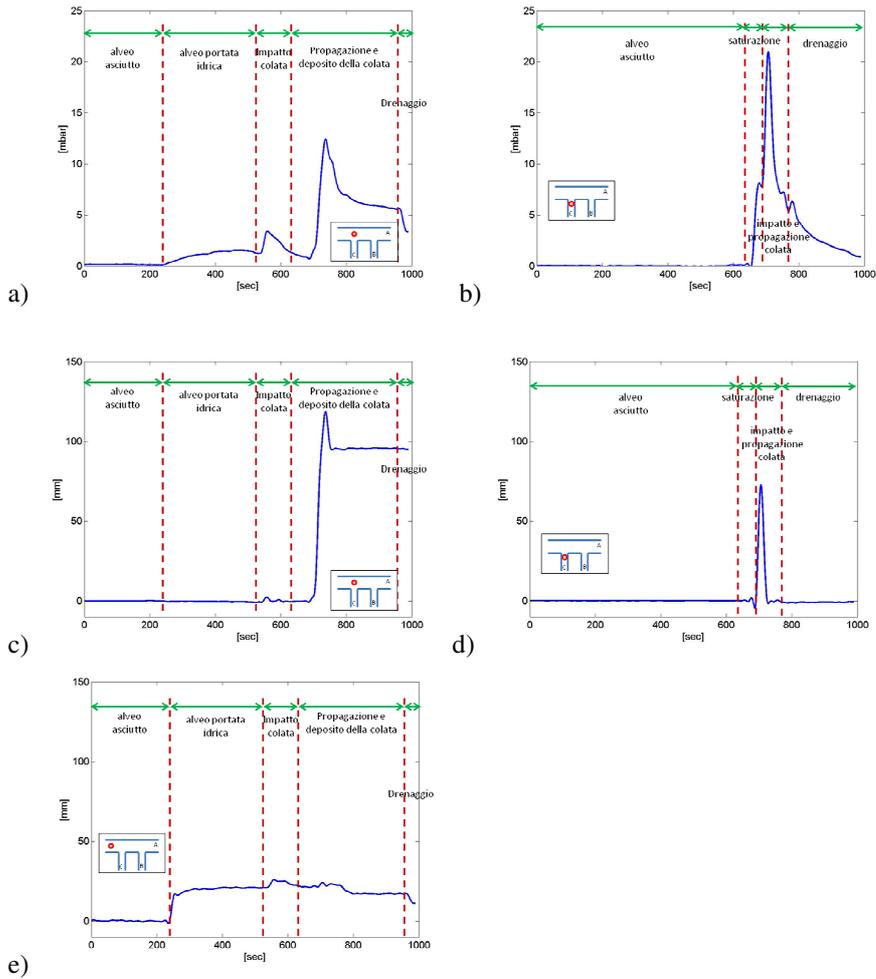


Figura 6.6 Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta C nel canale principale durante la prova 1: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta C; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta C; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.

6.3 Esperimento 2 ($\alpha=60^\circ$, $\beta=17^\circ$, C->B)

L'esperimento no.2 è caratterizzato dai parametri macroscopici e dai parametri idraulici di controllo riportati in Tabella 6.III. L'inclinazione della canaletta A è stata fissata a 5° e quelle delle canalette B e C a 17° . Lo strato di materiale posto lungo le canalette laterali è di 10 cm circa e la portata di saturazione degli ammassi è pari a 0.78 l/s, valore strettamente dipendente dalla tipologia di materiale utilizzato e dallo spessore dell'ammasso.

Tabella 6.III Parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e parametri idraulici adottati nell'esperimento 2: numero d'ordine della prova, portata fluente nella canaletta principale, angolo di confluenza delle canalette laterali e istanti di innesco delle colate e portata di innesco nelle canalette laterali.

N. exp.	canaletta A	canaletta B			canaletta C		
	Portata [l/s]	Angolo di confluenza	t_0 [s]	Portata di innesco [l/s]	Angolo di confluenza	t_0 [s]	Portata di innesco [l/s]
2	5.16	60°	176	3.35	60°	0	3.15

Durante l'esperimento sono stati innescati due differenti fenomeni di colate detritiche, il primo ha interessato la canaletta di valle (canale C) e dopo circa 3 minuti è stato innescato invece il fenomeno di colata detritica lungo la canaletta a monte (canale B).

In Figura 6.7, in Figura 6.8, in Figura 6.9 e in Figura 6.10 vengono presentate alcune immagini acquisite alla fine dell'esperimento in condizioni drenate. In particolare, dalla Figura 6.7 si evincono le forme di deposito realizzatesi lungo il canale A alla fine dell'esperimento. In Figura 6.8 si evincono le forme di deposito allo stadio finale agli sbocchi delle canalette B e C. In Figura 6.9a e in Figura 6.9b vengono rappresentate la quantità di materiale eroso durante l'esperimento lungo la canaletta laterale e la forma del deposito allo sbocco per la canaletta B; e in maniera analoga in Figura 6.10a e Figura 6.10b per la canaletta C.



Figura 6.7 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.2 ad esperimento concluso per l'intera estensione del canale A.

Da queste immagini si osservano i fenomeni di deposito a valle delle canalette B e C: si nota in particolare, come si sia realizzata lungo il canale A un'interazione tra i depositi di entità modesta. In particolare, l'interazione si è realizzata lungo il tratto di canale A compreso tra le due sezioni di sbocco delle colate interessando la sezione idrica del canale per una estensione lineare di circa 15 cm a partire dalla parete dove

sono collocati gli sbocchi stessi. Il deposito a valle della canaletta C è stato quello maggiormente eroso dalla portata che defluiva lungo il canale A, esso appare meno esteso se confrontato con quello formatosi a valle della canaletta B (vedi Figura 6.7 e Figura 6.8). L'erosione del deposito allo sbocco del canale B ha generato un trasporto solido lungo il canale A che ha interagito con il deposito sedimentatosi a valle della canaletta C, determinando un deposito di forma allungata a monte del deposito allo sbocco della canaletta C.



Figura 6.8 Vista generale dei depositi lungo la canaletta A in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.2 ad esperimento concluso.

Inoltre appare opportuno far notare come entrambi i fenomeni di colata innescati abbiano coinvolto pressoché tutto il materiale a disposizione (Figura 6.9a e Figura 6.10a), anche se una quantità minima di materiale è rimasta depositata nella zona valliva della canaletta C (Figura 6.10a).

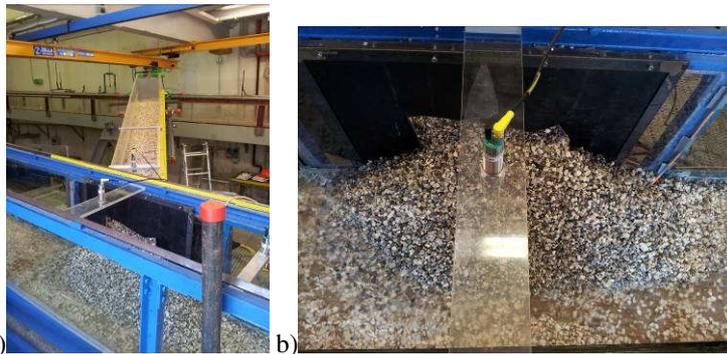


Figura 6.9 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.2 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta B; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta B.

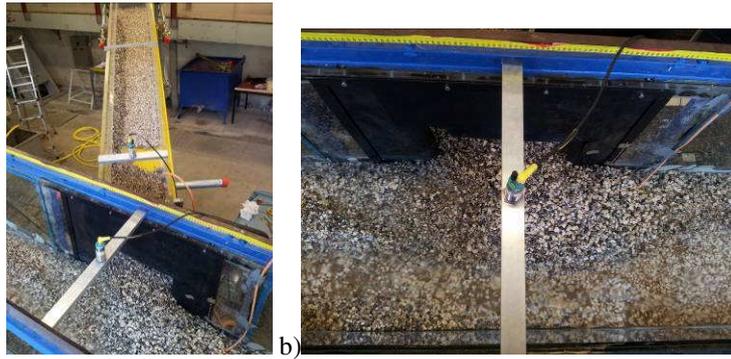


Figura 6.10 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.2 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta C; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta C.

La ricostruzione dei depositi nella canaletta A ottenuta per mezzo di rilievi effettuati con asta graduata viene riportata in Figura 6.11; anche in questo caso si nota la scarsa interazione tra i depositi e la maggiore estensione e volume del deposito allo sbocco della canaletta B rispetto a quello formatosi allo sbocco della canaletta C.

Dal confronto delle immagini (Figura 6.7) e del rilievo effettuato (Figura 6.11) è subito evidente come il deposito a valle della canaletta C è meno esteso sia a monte che a valle rispetto a quello della canaletta B.

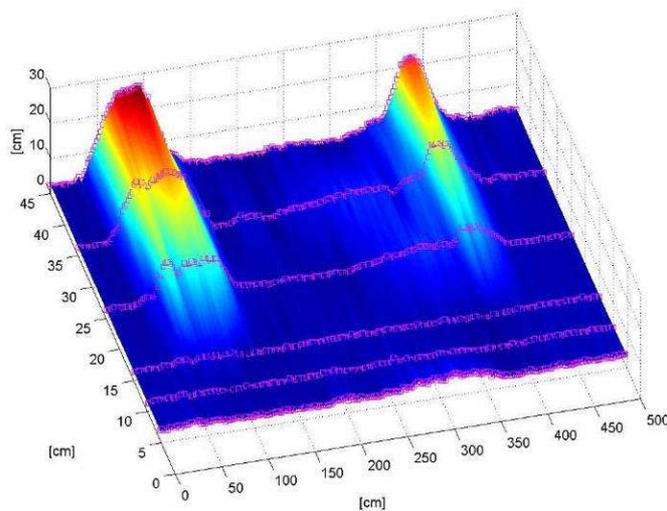


Figura 6.11 Ricostruzione tridimensionale dei depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.2.

Si sono acquisiti dati grazie all'utilizzo di sensori di livello acustici e di celle di pressione, posizionati in prossimità delle canalette B e C come descritto nel paragrafo

5.6. In Figura 6.12 e in Figura 6.13 si riportano gli andamenti della variazione della pressione e del livello nel tempo entrambi registrati in funzione della propagazione del fenomeno di colata.

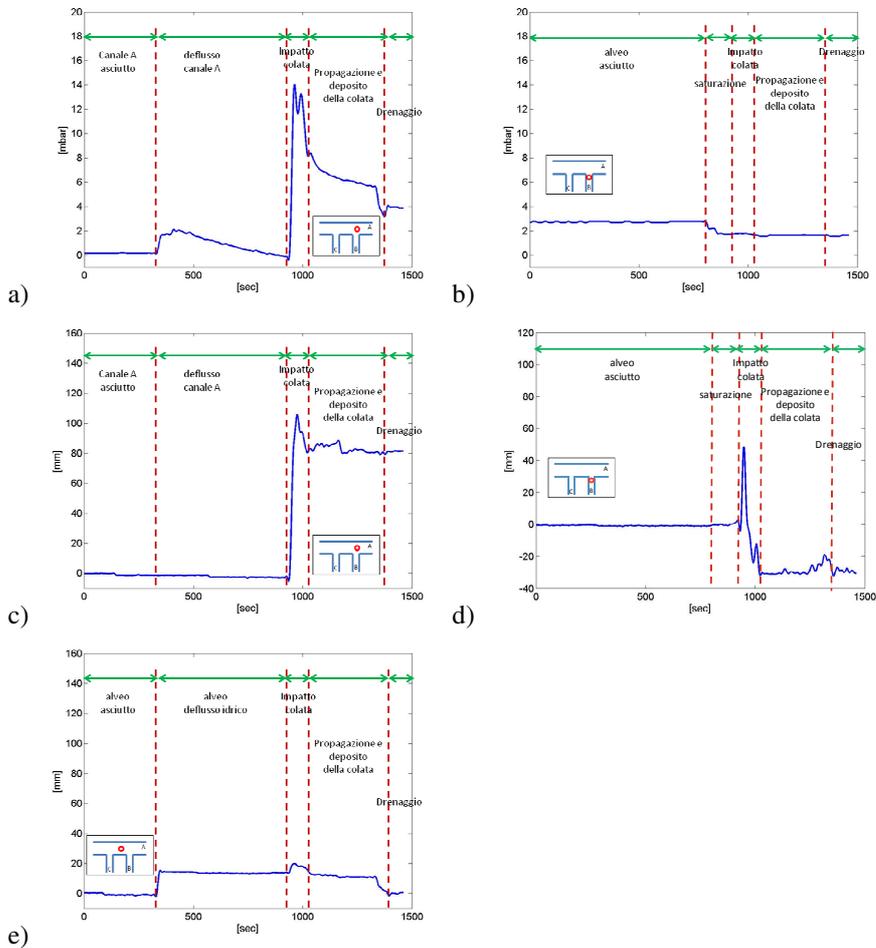


Figura 6.12 Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta B nel canale principale durante la prova 2: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta B; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta B; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.

La Figura 6.12a e la Figura 6.12c illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 2 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in

uno stesso punto della canaletta A, in prossimità dello sbocco della canaletta B. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 50 cm. L'accoppiamento tra la sonda di livello e la cella di pressione consente di cogliere alcuni interessanti aspetti della dinamica che caratterizza l'evoluzione e il deposito della colata.

L'andamento del grafico in Figura 6.12a indica che, a circa 300 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, tale fenomeno è verosimilmente attribuibile all'erogazione di portata nel canale principale (A). L'inizio del deposito dei sedimenti convogliati dalla colata detritica, generata lungo la canaletta B, si realizza attorno ai 900s. Nell'intervallo di tempo tra 900 s e 1200 s si osserva un comportamento intermittente del deposito, verosimilmente legato all'alternarsi di fasi di accrescimento e parziale erosione. Nell'intervallo di tempo compreso tra i 900 s e i 1050 s, si registra un notevole innalzamento dei valori acquisiti sia dalla cella di pressione che dalla sonda di livello (Figura 6.12a e Figura 6.12c). In particolare, la cella di pressione (Figura 6.12a) evidenzia, l'impatto dinamico della colata detritica sul fondo durante la fase di progressivo accrescimento del deposito individuato da due differenti picchi di pressione registrati in sequenza. Infine nell'intervallo compreso tra i 1200 s e i 1300s, la pressione al fondo e il livello della superficie subiscono un abbassamento verosimilmente attribuibili all'equilibrio dinamico del fenomeno di deposizione, mentre da 1300 s fino alla fine dell'esperimento si osserva la fase di drenaggio dell'ammasso.

La Figura 6.12b e la Figura 6.12d illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 2 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta B, in prossimità dello sbocco. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 20 cm. L'andamento del grafico in Figura 3b indica che, a circa 800 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un abbassamento di pressione, verosimilmente attribuibile all'innesco della colata e all'inizio della propagazione della stessa, con conseguente erosione dell'ammasso collocato sul fondo della canaletta B. In Figura 6.12d si registra che la propagazione della colata viene registrata nella sezione di misura nell'arco temporale compreso tra 800 s e 1400 s, inoltre si evidenzia che il colmo della colata nella sezione viene raggiunto a 900 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati. Infine nell'intervallo compreso tra i 600 s e la fine della prova, la pressione al fondo e il livello della superficie subiscono un abbassamento verosimilmente attribuibili all'arresto di erogazione della portata lungo la canaletta B.

La Figura 6.12e illustra l'andamento della sonda di livello posta lungo il canale A a 75 cm circa a valle dello sbocco con la canaletta B. Si registra anche in questo caso che a 300 s circa dall'inizio dell'acquisizione dati un aumento di livello conseguente all'inizio del deflusso idrico lungo il canale A, e successivamente un aumento di livello, anche se di entità modesta, nell'intervallo temporale compreso tra 900 s e 1200 s al trasporto solido conseguente all'erosione del materiale depositato più a monte. Anche in questo caso a 1300 s si registra un abbassamento di livello dovuto all'arresto del deflusso idrico lungo il canale A.

La Figura 6.13a e la Figura 613c illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta A, in prossimità dello sbocco della canaletta C.

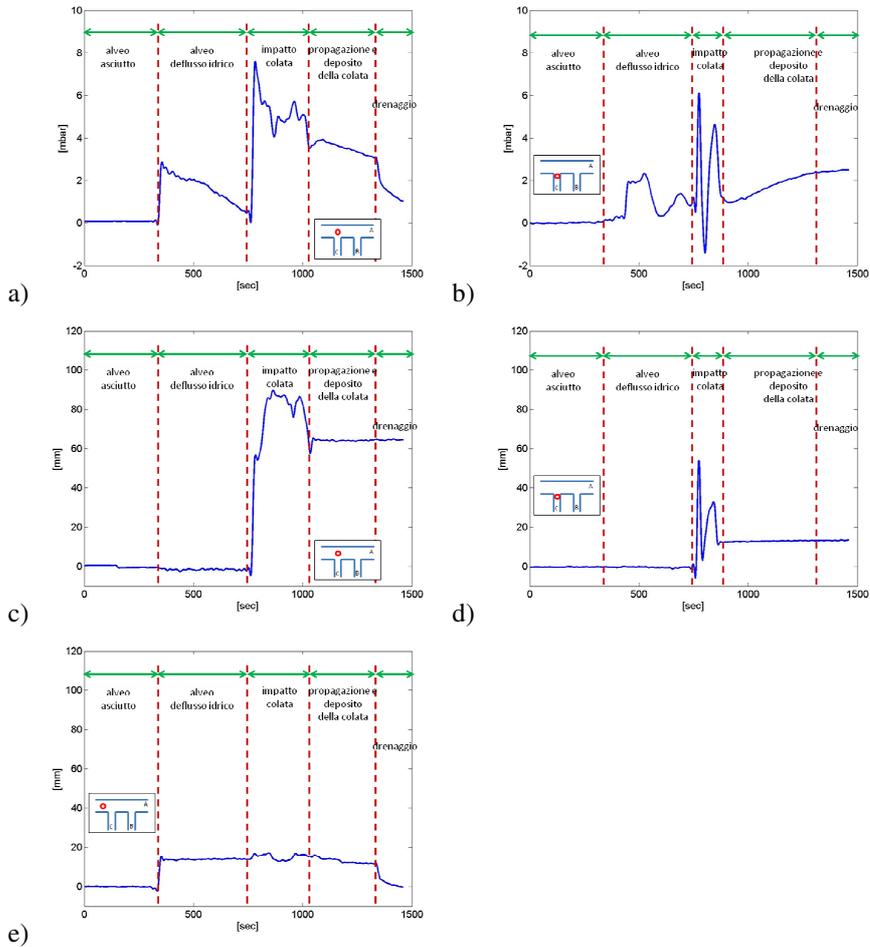


Figura 6.13 Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta C nel canale principale durante la prova 2: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta C; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta C; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.

Analogamente a quanto descritto per la canaletta B, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 50 cm. L'andamento del grafico in Figura

6.13a indica che, a circa 400 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, fenomeno conseguente all'inizio del deflusso idrico nel canale A e al contributo della portata di saturazione che filtra attraverso l'ammasso detritico inizialmente collocato nella canaletta C; fenomeno che viene rilevato dalla sonda di livello accoppiata con un leggero andamento ondulatorio (vedi Figura 6.13c). L'inizio del deposito dei sedimenti convogliati dalla colata detritica generata lungo la canaletta C si realizza attorno ai 700 s. Nell'intervallo di tempo tra 1050 s e i 1450s si osserva un notevole innalzamento dei valori acquisiti sia dalla cella di pressione che dalla sonda di livello, fenomeno conseguente al passaggio dell'onda di piena. Infine nell'intervallo compreso tra i 1400 s e la fine della prova, la pressione al fondo e il livello della superficie subiscono un abbassamento verosimilmente attribuibili al drenaggio dell'ammasso.

La Figura 6.13b e la Figura 6.13d illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 2 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta C, in prossimità dello sbocco. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 20 cm. L'andamento del grafico in Figura 4b indica che, a circa 400 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, verosimilmente attribuibile all'erogazione della portata di saturazione. Mentre in Figura 6.13d si registra che la propagazione della colata viene registrata nella sezione di misura nell'arco temporale compreso tra 750 s e 900 s. Infine nell'intervallo compreso tra i 900 s e la fine della prova, la pressione al fondo e il livello della superficie subiscono un abbassamento verosimilmente attribuibili all'arresto della portata erogata lungo il canale C.

La Figura 6.13e illustra l'andamento della sonda di livello posta lungo il canale A a 75 cm circa a valle dello sbocco con la canaletta C. Si registra anche in questo caso, a 400 s circa dall'inizio dell'acquisizione dati, un aumento di livello conseguente all'inizio del deflusso idrico lungo il canale A, e successivamente un aumento di livello, anche se di entità modesta, nell'intervallo temporale compreso tra 750 s e 900 s al trasporto solido conseguente all'erosione del materiale depositato più a monte. Anche in questo caso per tempi superiore ai 1400 s si registra un abbassamento di livello dovuto all'arresto del deflusso idrico lungo il canale A.

6.4 Esperimento 3 ($\alpha=60^\circ$, $\beta=17^\circ$, B=C)

L'esperimento no.3 è caratterizzato dai parametri macroscopici e dai parametri idraulici di controllo riportati in Tabella 6.IV. L'inclinazione della canaletta A è stata fissata a 5° e quelle delle canalette B e C a 17° . Lo strato di materiale posto lungo le canalette laterali è di 10 cm circa e la portata di saturazione degli ammassi è pari a 0.78 l/s, valore strettamente dipendente dalla tipologia di materiale utilizzato e dallo spessore dell'ammasso.

Tabella 6.IV Parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e parametri idraulici adottati nell'esperimento 3: numero d'ordine della prova, portata fluente nella canaletta principale, angolo di confluenza delle canalette laterali e istanti di innesco delle colate e portata di innesco nelle canalette laterali.

N. exp.	canaletta A	canaletta B			canaletta C		
	Portata [l/s]	Angolo di confluenza	t_0 innesco [s]	Portata di innesco [l/s]	Angolo di confluenza	t_0 innesco [s]	Portata di Innesco [l/s]
3	5.02	60°	0	3.35	60°	0	3.15

Durante l'esperimento sono stati innescati due differenti fenomeni di colate detritiche, che si sono propagati contemporaneamente lungo le due canalette laterali (canale B e canale C).

In Figura 6.14, Figura 6.15 e Figura 6.16 vengono presentate alcune immagini acquisite alla fine dell'esperimento, in condizioni drenate. In particolare, dalla Figura 6.14 si evincono le forme di deposito realizzatesi lungo il canale A alla fine dell'esperimento. In Figura 6.15a e in Figura 6.15b vengono rappresentate la quantità di materiale eroso durante l'esperimento lungo la canaletta laterale e la forma del deposito allo sbocco per la canaletta B; e in maniera analoga in Figura 6.16a e in Figura 6.16b per la canaletta C.



Figura 6.14 Vista generale dei depositi lungo la canaletta A in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.3 ad esperimento concluso.

Da queste immagini si osservano i fenomeni di deposito a valle delle canalette B e C: si nota in particolare, come si sia realizzata lungo il canale A un'interazione tra i depositi. L'interazione si è realizzata lungo tutto il tratto di canale A compreso tra le due sezioni di sbocco delle colate interessando la sezione idrica del canale per una estensione lineare di circa 20 cm a partire dalla parete dove sono collocati gli sbocchi stessi. Entrambi i depositi presentano uguale estensione anche se la porzione più a valle del deposito allo sbocco del canale B appare maggiormente eroso se confrontato con quello formatosi a valle della canaletta C (vedi Figura 6.15b e Figura 6.16b). L'erosione del deposito allo sbocco del canale B ha generato un trasporto solido lungo il canale A che ha interagito con il deposito sedimentatosi a valle della canaletta C, determinando la formazione continua di deposito lungo il tratto di canale che collega i due sbocchi delle

canalette laterali (canale B e canale C). Inoltre appare opportuno far notare come entrambi i fenomeni di colata innescati abbiano coinvolto pressoché tutto il materiale a disposizione (vedi Figura 6.15a e Figura 6.16a).



Figura 6.15 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.3 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta B; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta B.



Figura 6.16 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.3 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta C; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta C.

La ricostruzione dei depositi nella canaletta A ottenuta per mezzo di rilievi effettuati con asta graduata viene riportata in Figura 6.17; anche in questo caso si nota l'interazione tra i depositi e il maggiore volume del deposito allo sbocco della canaletta C rispetto a quello formatosi allo sbocco della canaletta B.

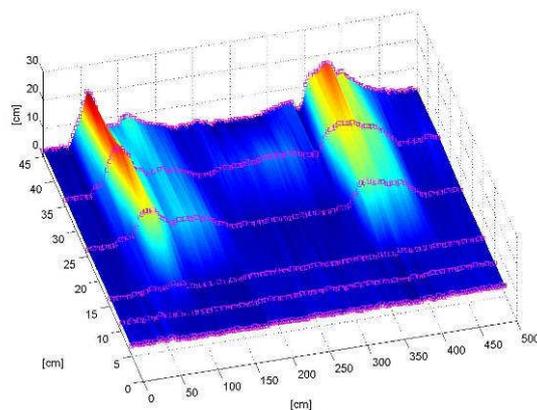


Figura 6.17 Ricostruzione tridimensionale dei depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.3.

Si sono acquisiti dati grazie all'utilizzo di sensori di livello acustici e di celle di pressione, posizionati in prossimità delle canalette B e C come descritto nel paragrafo 5.6. In Figura 6.18 e Figura 6.19 si riportano gli andamenti della variazione della pressione e del livello nel tempo entrambi registrati in funzione della propagazione del fenomeno di colata.

La Figura 6.18a e Figura 6.18c illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 3 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta A, in prossimità dello sbocco della canaletta B. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 50 cm. L'accoppiamento tra la sonda di livello e la cella di pressione consente di cogliere alcuni interessanti aspetti della dinamica che caratterizza l'evoluzione e il deposito della colata.

L'andamento del grafico in Figura 6.18a indica che, a circa 200 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, tale fenomeno è verosimilmente attribuibile all'erogazione di portata nel canale principale (A). L'inizio del deposito dei sedimenti convogliati dalla colata detritica, generata lungo la canaletta B, si realizza attorno ai 570s. Nell'intervallo di tempo compreso tra i 570 s e i 780 s, si registra un notevole innalzamento dei valori acquisiti sia dalla cella di pressione che dalla sonda di livello (Figura 6.18a e Figura 6.18c). In particolare, la cella di pressione (Figura 6.18a) evidenzia, l'impatto dinamico della colata detritica sul fondo durante la fase di progressivo accrescimento del deposito individuabile in Figura 6.18a nella fase di picco.

Infine nell'intervallo compreso tra i 780 s e i 990s, la pressione al fondo e il livello della superficie subiscono un abbassamento verosimilmente attribuibili all'equilibrio dinamico del fenomeno di deposizione, mentre da 990 s fino alla fine dell'esperimento si osserva un abbassamento nell'andamento delle pressioni (Figura 6.18a) conseguente alla fase di drenaggio dell'ammasso.

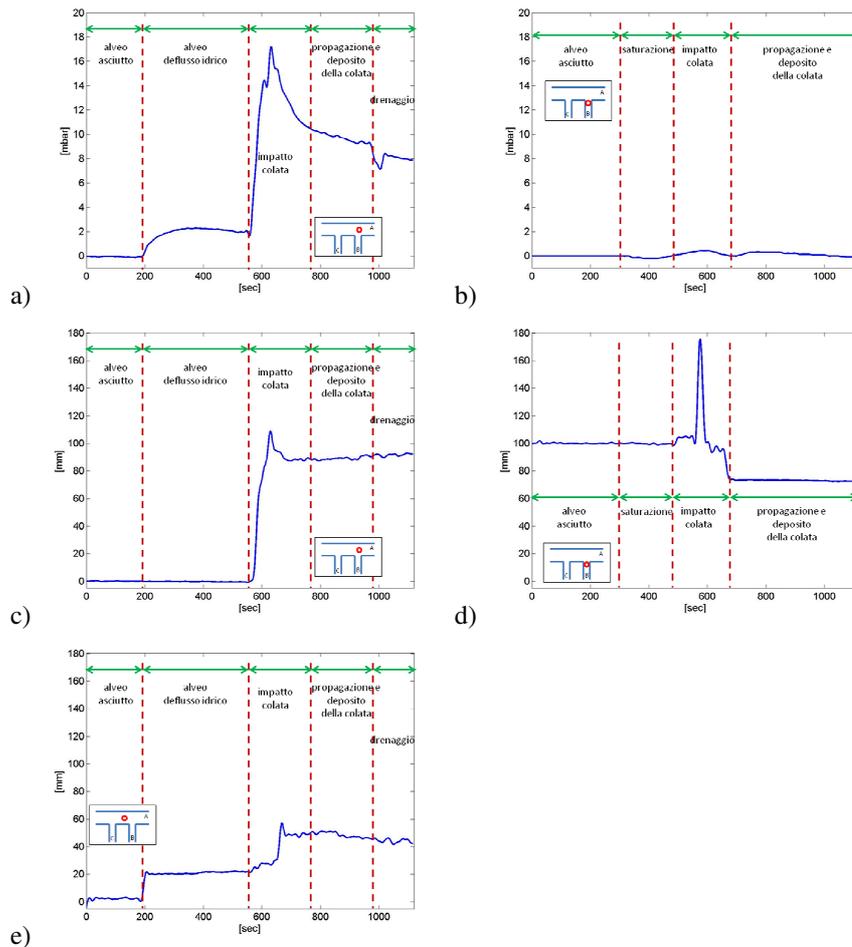


Figura 6.18 Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta B nel canale principale durante la prova 3: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta B; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta B; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.

La Figura 6.18b e la Figura 6.18d illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 3 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta B, in prossimità dello sbocco. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 20 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.18b indica che, nell'intervallo compreso tra i 300 s e i 500 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un abbassamento di pressione, verosimilmente

attribuibile alla saturazione dell'ammasso. In Figura 6.18d si registra che la propagazione della colata viene registrata nella sezione di misura nell'arco temporale compreso tra 500 s e 680 s, inoltre si evidenzia che il colmo della colata nella sezione viene raggiunto a 600 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati. Infine nell'intervallo compreso tra i 680 s e la fine della prova, la pressione al fondo e il livello della superficie subiscono un abbassamento verosimilmente attribuibili all'arresto di erogazione della portata lungo la canaletta B.

La Figura 6.18e illustra l'andamento della sonda di livello posta lungo il canale A a 75 cm circa a valle dello sbocco con la canaletta B. Si registra anche in questo caso che a 200 s circa dall'inizio dell'acquisizione dati un aumento di livello conseguente all'inizio del deflusso idrico lungo il canale A. Successivamente si nota un ulteriore aumento di livello nell'intervallo temporale compreso tra 580 s e la fine dell'acquisizione dati dove si evidenzia la fase di propagazione e deposito del materiale sulla sezione di misura, in particolare a 700 s dall'inizio dell'acquisizione dati si evidenzia in Figura 6.18e l'impatto della colata.

La Figura 6.19a e la Figura 6.19c illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta A, in prossimità dello sbocco della canaletta C. Analogamente a quanto descritto per la canaletta B, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 50 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.19a indica che, a circa 200 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, fenomeno conseguente all'inizio del deflusso idrico nel canale A e al contributo della portata di saturazione che filtra attraverso l'ammasso detritico inizialmente collocato nella canaletta C; fenomeno che viene rilevato dalla sonda di livello accoppiata con un leggero andamento ondulatorio (vedi Figura 6.19c). L'inizio del deposito dei sedimenti convogliati dalla colata detritica generata lungo la canaletta C si realizza attorno ai 580 s. L'impatto della colata viene registrato nella sezione di misura a circa 650 s dall'inizio dell'acquisizione dati. Nell'intervallo di tempo tra 700 s e i 1000s si osserva, sia dalla cella di pressione che dalla sonda di livello, un andamento caratteristico della propagazione della colata. Infine nell'intervallo compreso tra i 1000 s e la fine della prova, la pressione al fondo e il livello della superficie subiscono un abbassamento verosimilmente attribuibili al drenaggio dell'ammasso.

La Figura 6.19b e la Figura 6.19d illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 3 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta C, in prossimità dello sbocco. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 20 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.19b indica che, a circa 150 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, verosimilmente attribuibile all'erogazione della portata di saturazione. Il passaggio del colmo caratteristico della propagazione della colata viene registrato, sia dalla cella di pressione che dal sensore di livello (Figura 6.19b e Figura 6.19d) nella sezione di misura nell'arco temporale compreso tra 580 s e 640 s. Infine nell'intervallo compreso tra i 900 s e la fine della prova, la pressione al fondo subisce un abbassamento verosimilmente attribuibile all'arresto della portata erogata lungo il canale C.

La Figura 6.19e illustra l'andamento della sonda di livello posta lungo il canale A a 75 cm circa a valle dello sbocco con la canaletta C. Si registra anche in questo caso, a 200 s circa dall'inizio dell'acquisizione dati, un aumento di livello conseguente all'inizio del deflusso idrico lungo il canale A, e successivamente un aumento di livello, anche se di entità modesta, nell'intervallo temporale compreso tra 580 s e 700 s al trasporto solido conseguente all'erosione del materiale depositato più a monte. Anche in questo caso per tempi superiore ai 1000 s si registra un abbassamento di livello dovuto all'arresto del deflusso idrico lungo il canale A.

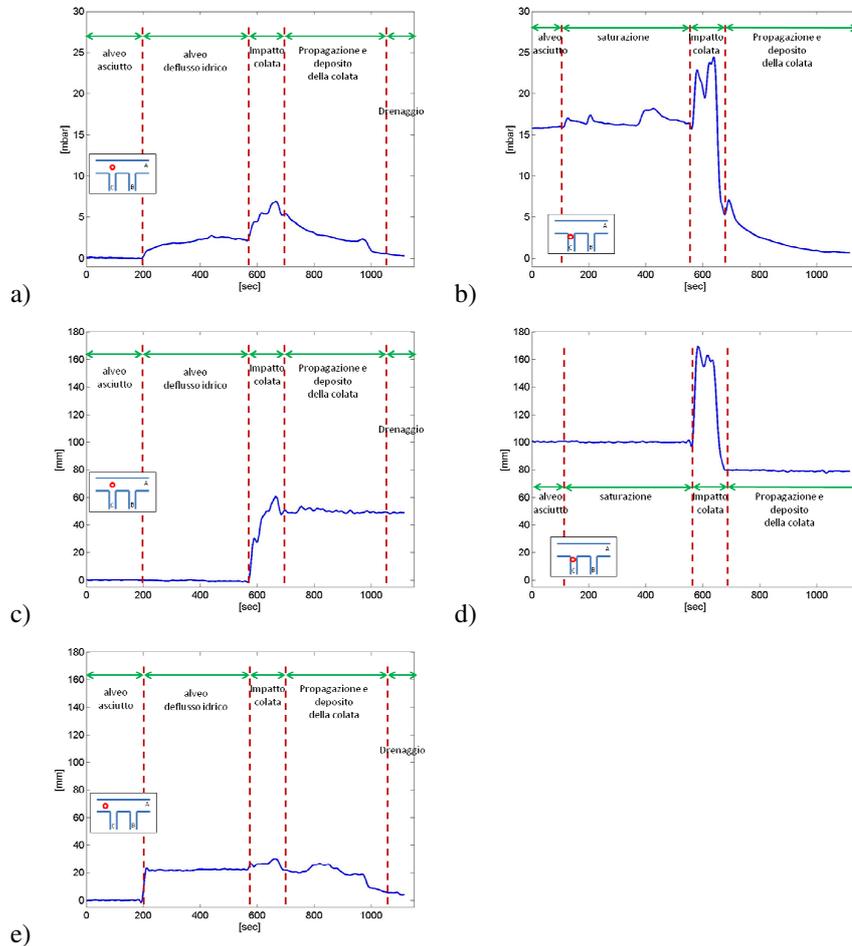


Figura 6.19 Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta C nel canale principale durante la prova 3: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta C; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta C; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.

6.5 Esperimento 4 ($\alpha=50^\circ$, $\beta=17^\circ$, B->C)

L'esperimento no.4 è caratterizzato dai parametri macroscopici e dai parametri idraulici di controllo riportati in Tabella 6.V. L'inclinazione della canaletta A è stata fissata a 5° e quelle delle canalette B e C a 17° . Lo strato di materiale posto lungo le canalette laterali è di 10 cm circa e la portata di saturazione degli ammassi è pari a 0.78 l/s, valore strettamente dipendente dalla tipologia di materiale utilizzato e dallo spessore dell'ammasso.

Tabella 6.V Parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e parametri idraulici adottati nell'esperimento 4: numero d'ordine della prova, portata fluente nella canaletta principale, angolo di confluenza delle canalette laterali e istanti di innesco delle colate e portata di innesco nelle canalette laterali.

N. exp.	canaletta A	canaletta B			canaletta C		
	Portata [l/s]	Angolo di confluenza	t_0 innesco [s]	Portata di innesco [l/s]	Angolo di confluenza	t_0 innesco [s]	Portata di innesco [l/s]
4	5.18	50°	0	3.35	50°	175	3.15

Durante l'esperimento si sono innescati due differenti colate detritiche. Inizialmente si è innescata la colata lungo la canaletta di monte (canaletta B) e successivamente, dopo circa 3 minuti, si è innescata la colata nella canaletta a valle (Canale C).

In Figura 6.20, in Figura 6.21, in Figura 6.22 e in Figura 6.23 vengono presentate alcune immagini acquisite alla fine dell'esperimento, in condizioni drenate. In particolare, da Figura 6.20a e da Figura 6.21 si evincono le forme di deposito allo stadio finale per l'intera estensione del canale A, con una vista dall'alto (Figura 6.20) e in sezione (Figura 6.21). In Figura 6.22a e in Figura 6.22b vengono rappresentate la quantità di materiale eroso durante l'esperimento lungo la canaletta laterale e la forma del deposito allo sbocco per la canaletta B; e in maniera analoga in Figura 6.23a e in Figura 6.23b per la canaletta C.



Figura 6.20 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.4 ad esperimento concluso per l'intera estensione del canale A.



Figura 6.21 Vista generale dei depositi lungo la canaletta A in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.4 ad esperimento concluso.



Figura 6.22 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.4 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta B; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta B.



Figura 6.23 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.4 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta C; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta C.

Da queste immagini si osservano i fenomeni di deposito a valle delle canalette B e C: si osserva, in particolare, la debole interazione tra i fenomeni di deposito, condizione resa evidente in Figura 6.20 e in Figura 6.21 dove si nota chiaramente come l'erosione del deposito a valle della canaletta B abbia interagito in piccola parte con il deposito della canaletta C. Anche se la portata defluente lungo il canale A ha comunque effettuato una azione erosiva e di trasporto del materiale eroso e pervenuto lungo le canalette B e C, tanto è vero che a valle si sono riscontrati importati depositi di materiale (vedi Figura 6.20). Inoltre appare opportuno far notare come il fenomeno di colata innescato nel canale B non abbia coinvolto tutto il materiale a disposizione. Infatti si vede come sia rimasto parte del materiale nella zona valliva della canaletta (Figura 6.22a), mentre per la canaletta C il materiale a disposizione è stato coinvolto nella sua globalità dal fenomeno di colata (Figura 6.23a).

La ricostruzione dei depositi nella canaletta A ottenuta per mezzo di rilievi effettuati con asta graduata viene riportata in Figura 6.24. Anche in questo caso la scarsa interazione tra i depositi che la maggiore estensione e il maggiore volume del deposito allo sbocco della canaletta C rispetto a quello formatosi allo sbocco della canaletta B.

Dal confronto delle immagini (Figura 6.20) e del rilievo effettuato (Figura 6.24) è subito evidente come il deposito a valle della canaletta C sia maggiormente esteso sia a monte che a valle rispetto a quello della canaletta B.

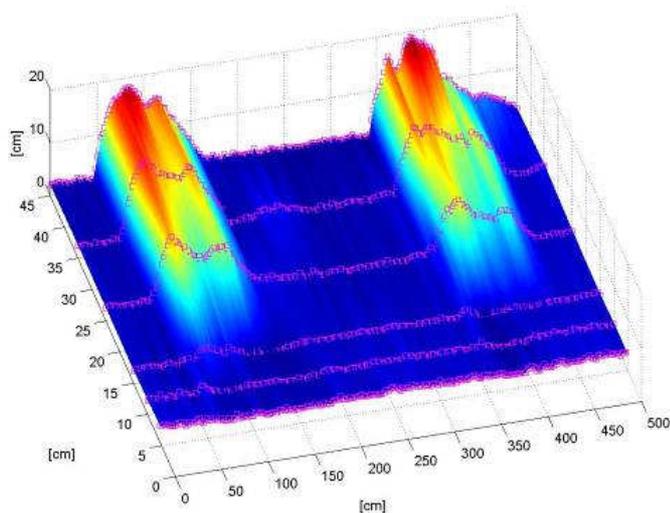


Figura 6.24 Ricostruzione tridimensionale dei depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.4.

Si sono acquisiti dati grazie all'utilizzo di sensori di livello acustici e di celle di pressione, posizionati in prossimità delle canalette B e C come descritto nel paragrafo 5.6. In Figura 6.25 e in Figura 6.26 si riportano gli andamenti della variazione della pressione e del livello nel tempo entrambi registrati in funzione della propagazione del fenomeno di colata.

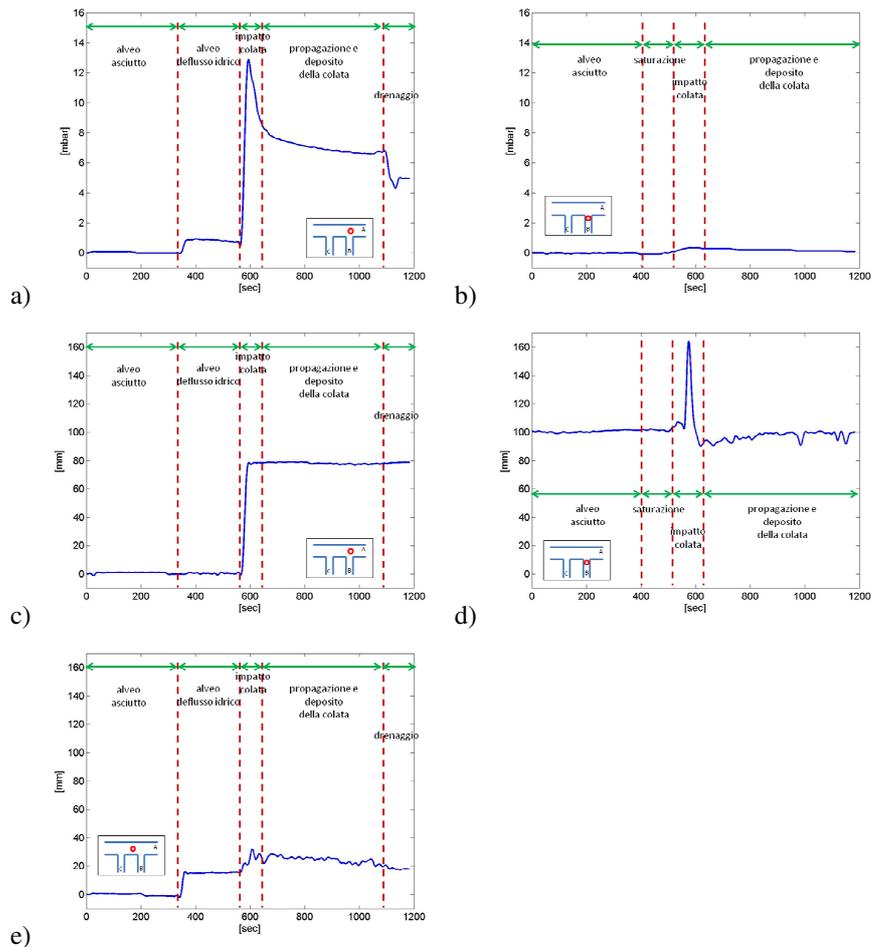


Figura 6.25 Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta B nel canale principale durante la prova 4: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta B; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta B; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.

La Figura 6.25a e la Figura 6.25c illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 4 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta A, in prossimità dello sbocco della canaletta B. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 50 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.25a indica che, a circa 330 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, della durata di circa 250 s.

Tale fenomeno è verosimilmente attribuibile all'aumento di portata nel canale principale (A) dovuto al contributo della portata di saturazione che filtra attraverso l'ammasso detritico inizialmente collocato nella canaletta C. Tale fenomeno invece viene avvertito dalla sonda di livello accoppiata con un leggero andamento ondulatorio (vedi Figura 6.25c). L'inizio del deposito dei sedimenti convogliati dalla colata detritica, generata lungo la canaletta B, si realizza attorno ai 580s. Nell'intervallo di tempo tra 580 s e 1100 s si osserva un comportamento abbastanza stazionario del deposito, verosimilmente legato all'alternarsi di fasi di accrescimento e erosione del deposito in equilibrio dinamico tra loro. In tale intervallo di tempo si registra un notevole innalzamento dei valori acquisiti sia dalla cella di pressione che dalla sonda di livello. In particolare, la cella di pressione evidenzia, l'impatto dinamico della colata detritica sul fondo durante la fase di progressivo accrescimento del deposito individuato da un picco di pressione registrato a 590 s. Infine nell'intervallo compreso tra i 1100 s e la fine della prova, la pressione al fondo subisce un abbassamento verosimilmente attribuibile al drenaggio dell'ammasso.

La Figura 6.25b e la Figura 6.25d illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 4 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta B, in prossimità dello sbocco. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 20 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.25b indica che, a circa 400 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, verosimilmente attribuibile all'erogazione della portata di saturazione. Mentre in Figura 6.25d si registra che la propagazione della colata viene registrata nella sezione di misura nell'arco temporale compreso tra 500 s e 620 s, il passaggio del colmo della propagazione della colata viene rilevato nella sezione di misura a 580s dall'inizio dell'acquisizione dati. Infine nell'intervallo compreso tra i 620 s e la fine della prova, la pressione al fondo e il livello della superficie subiscono un abbassamento verosimilmente attribuibili all'arresto dell'erogazione di portata lungo il canale B.

La Figura 6.25e illustra l'andamento della sonda di livello posta lungo il canale A a 75 cm circa a valle dello sbocco con la canaletta B. Si registra anche in questo caso che a 330 s circa dall'inizio dell'acquisizione dati un aumento di livello conseguente all'inizio del deflusso idrico lungo il canale A, e successivamente un aumento di livello, anche se di entità modesta, nell'intervallo temporale compreso tra 580s e 1100 s al trasporto solido conseguente all'erosione del materiale depositato più a monte. Anche in questo caso per tempi superiori ai 1100 s si registra un abbassamento di livello dovuto all'arresto del deflusso idrico lungo il canale A.

La Figura 6.26a e la Figura 6.26c illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta A, in prossimità dello sbocco della canaletta C. Analogamente a quanto descritto per la canaletta B, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 50 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.26a indica che, a circa 380 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, fenomeno conseguente all'inizio del deflusso idrico nel canale A. L'inizio del deposito dei sedimenti convogliati dalla colata detritica, generata lungo la canaletta C, si realizza

attorno ai 750s. Nell'intervallo di tempo tra 750 s e 1100 s si osserva un notevole innalzamento dei valori acquisiti sia dalla cella di pressione che dalla sonda di livello, fenomeno conseguente al passaggio dell'onda di piena, l'impatto della colata si registra a circa 800 s dall'inizio di acquisizione dei dati. Infine nell'intervallo compreso tra i 1100 s e la fine della prova, la pressione al fondo e il livello della superficie subiscono un abbassamento verosimilmente attribuibile al drenaggio dell'ammasso.

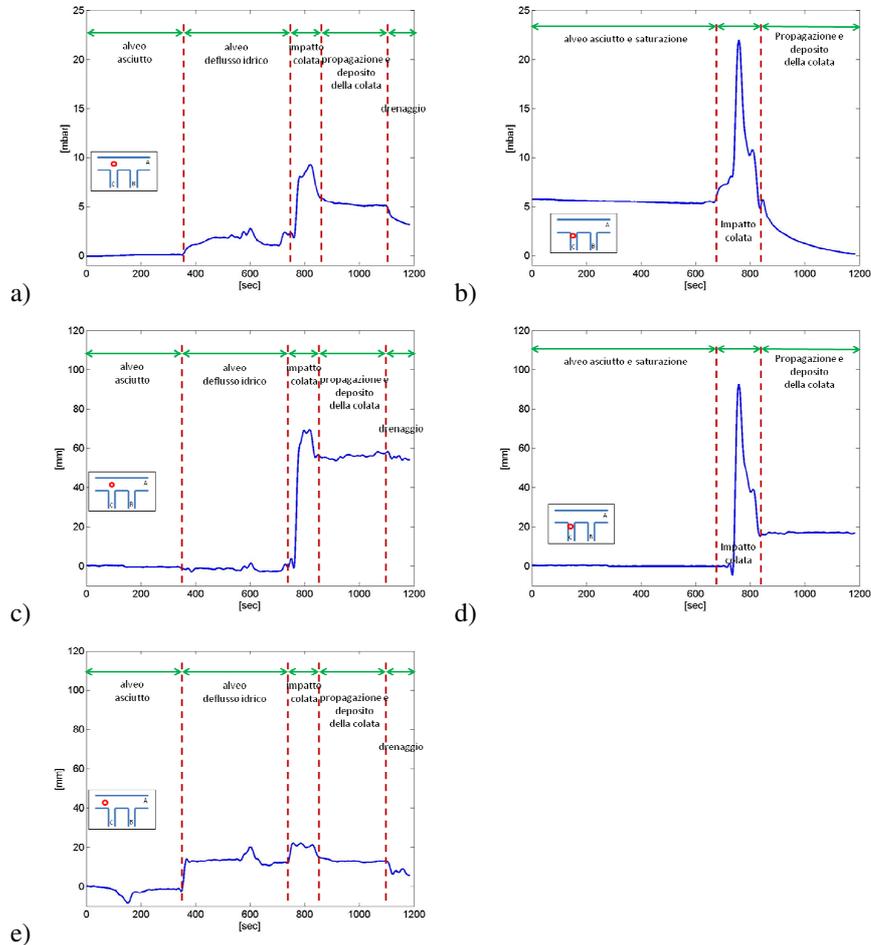


Figura 6.26 Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta C nel canale principale durante la prova 4: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta C; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta C; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.

La Figura 6.26b e la Figura 6.26d illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 4 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta C, in prossimità dello sbocco. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 20 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.26b e quello in Figura 6.26d indicano che, a circa 670 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, verosimilmente attribuibile alla fase di innesco della colata. La propagazione della colata viene registrata nella sezione di misura nell'arco temporale compreso tra 670 s e 830 s, mentre il passaggio del colmo dell'onda di propagazione della colata avviene a circa 780 s. Infine nell'intervallo compreso tra i 1100 s e la fine della prova, la pressione al fondo subisce un abbassamento verosimilmente attribuibile all'arresto di erogazione di portata lungo il canale C.

La Figura 6.26e illustra l'andamento della sonda di livello posta lungo il canale A a 75 cm circa a valle dello sbocco con la canaletta C. Si registra anche in questo caso, a 380 s circa dall'inizio dell'acquisizione dati, un aumento di livello conseguente all'inizio del deflusso idrico lungo il canale A, e successivamente un aumento di livello, anche se di entità modesta, nell'intervallo temporale compreso tra 780s e 850 s al trasporto solido conseguente all'erosione del materiale depositato più a monte. Anche in questo caso per tempi superiori ai 1100 s si registra un abbassamento di livello dovuto all'arresto del deflusso idrico lungo il canale A.

6.6 Esperimento 5 ($\alpha=50^\circ$, $\beta=17^\circ$, C->B)

L'esperimento no.5 è caratterizzato dai parametri macroscopici e dai parametri idraulici di controllo riportati in Tabella 6.VI. L'inclinazione della canaletta A è stata fissata a 5° e quelle delle canalette B e C a 17° . Lo strato di materiale posto lungo le canalette laterali è di 10 cm circa e la portata di saturazione degli ammassi è pari a 0.78 l/s, valore strettamente dipendente dalla tipologia di materiale utilizzato e dallo spessore dell'ammasso.

Tabella 6.VI Parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e parametri idraulici adottati nell'esperimento 5: numero d'ordine della prova, portata fluente nella canaletta principale, angolo di confluenza delle canalette laterali e istanti di innesco delle colate e portata di innesco nelle canalette laterali.

N. exp.	canaletta A	canaletta B			canaletta C		
	Portata [l/s]	Angolo di confluenza	t_0 innesco [s]	Portata di innesco [l/s]	Angolo di confluenza	t_0 innesco [s]	Portata di innesco [l/s]
5	5.05	50°	222	3.35	50°	0	3.15

Durante l'esperimento sono stati innescati due differenti fenomeni di colate detritiche, il primo ha interessato la canaletta di valle (canale C) e dopo circa 3 minuti e mezzo è stato innescato invece il fenomeno di colata detritica lungo la canaletta a monte (canale B).

In Figura 6.27, in Figura 6.28 e in Figura 6.29 vengono presentate alcune immagini acquisite alla fine dell'esperimento, in condizioni drenate. In particolare, dalla Figura 6.27 si evincono le forme di deposito realizzatesi lungo il canale A alla fine dell'esperimento. In Figura 6.28a e in Figura 6.28b vengono rappresentate la quantità di materiale eroso durante l'esperimento lungo la canaletta laterale e la forma del deposito allo sbocco per la canaletta B; e in maniera analoga in Figura 6.29a e in Figura 6.29b per la canaletta C.



Figura 6.27 Vista generale dei depositi lungo la canaletta A in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.5 ad esperimento concluso.



Figura 6.28 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.5 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta B; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta B.

Da queste immagini si osservano i fenomeni di deposito a valle delle canalette B e C: si nota in particolare, come si sia realizzata lungo il canale A un'interazione tra i depositi di entità modesta. In particolare, l'interazione si è realizzata lungo il tratto di canale A interessando una la porzione a monte dello sbocco del canale C. Il deposito a valle della canaletta C è stato quello maggiormente eroso dalla portata che defluiva lungo il canale A, esso appare meno esteso se confrontato con quello formatosi a valle della canaletta B (vedi Figura 6.28b e 6.29b). L'erosione del deposito allo sbocco del canale B ha generato un trasporto solido lungo il canale A che ha interagito con il

deposito sedimentatosi a valle della canaletta C, determinando un deposito di forma allungata a monte del deposito allo sbocco della canaletta C. Inoltre appare opportuno far notare come entrambi i fenomeni di colata innescati abbiano coinvolto pressoché tutto il materiale a disposizione (Figura 6.28a e Figura 6.29a), anche se una quantità minima di materiale è rimasta depositata nella zona valliva delle due canalette.

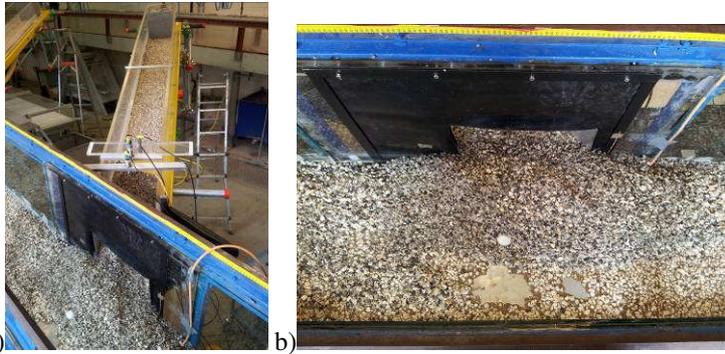


Figura 6.29 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.5 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta C; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta C.

La ricostruzione dei depositi nella canaletta A ottenuta per mezzo di rilievi effettuati con asta graduata viene riportata in Figura 6.30; anche in questo caso si nota la scarsa interazione tra i depositi e la maggiore estensione e volume del deposito allo sbocco della canaletta B rispetto a quello formatosi allo sbocco della canaletta C.

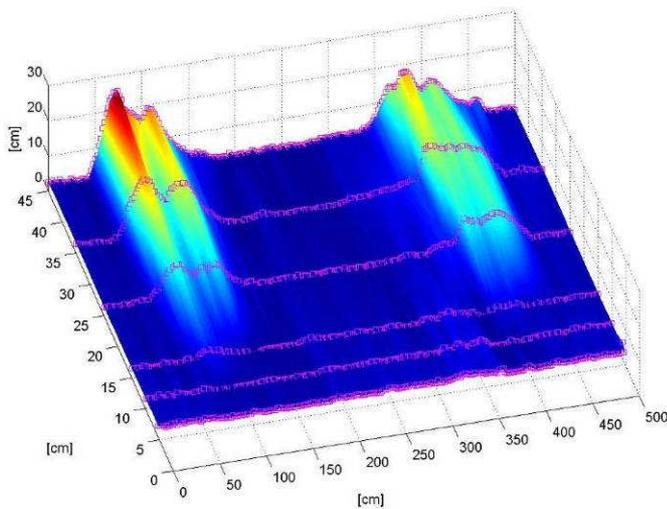


Figura 6.30 Ricostruzione tridimensionale dei depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.5.

Dal confronto delle immagini (Figura 6.27) e del rilievo effettuato (Figura 6.30) è subito evidente come il deposito a valle della canaletta C è di minor volume rispetto a quello della canaletta B.

In Figura 6.31 e in Figura 6.32 si riportano gli andamenti della variazione della pressione e del livello nel tempo entrambi registrati in funzione della propagazione del fenomeno di colata.

La Figura 6.31a e la Figura 6.31c illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 5 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta A, in prossimità dello sbocco della canaletta B. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 50 cm. L'accoppiamento tra la sonda di livello e la cella di pressione consente di cogliere alcuni interessanti aspetti della dinamica che caratterizza l'evoluzione e il deposito della colata.

L'andamento del grafico in Figura 6.31a indica che, a circa 200 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, tale fenomeno è verosimilmente attribuibile all'erogazione di portata nel canale principale (A). L'inizio del deposito dei sedimenti convogliati dalla colata detritica, generata lungo la canaletta B, si realizza attorno ai 750s. Nell'intervallo di tempo compreso tra i 750 s e i 1200 s, si registra un notevole innalzamento dei valori acquisiti sia dalla cella di pressione che dalla sonda di livello (Figura 6.31a e Figura 6.31c). In particolare, la cella di pressione (Figura 6.31 a) evidenzia, l'impatto dinamico della colata detritica sul fondo durante la fase di progressivo accrescimento del deposito individuato da un picco di pressione registrato a 800 s dall'inizio di acquisizione dei dati. Infine nell'intervallo compreso tra i 900 s e i 1200s, si osserva un comportamento intermittente del deposito, verosimilmente legato all'alternarsi di fasi di accrescimento e parziale erosione; mentre da 1200 s fino alla fine dell'esperimento si osserva attraverso l'andamento registrato dalla cella di pressione la fase di drenaggio dell'ammasso.

La Figura 6.31b e la Figura 6.31d illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 5 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta B, in prossimità dello sbocco. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 20 cm. L'andamento del grafico in Figura 3b indica che, a circa 750 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un innalzamento di pressione, verosimilmente attribuibile all'innescò della colata e all'inizio della propagazione della stessa, con conseguente erosione dell'ammasso collocato sul fondo della canaletta B. In Figura 6.31d si registra che la propagazione della colata viene registrata nella sezione di misura nell'arco temporale compreso tra 750 s e 900 s, inoltre si evidenzia che il colmo della colata nella sezione viene raggiunto a 800 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati.

La Figura 6.31e illustra l'andamento della sonda di livello posta lungo il canale A a 75 cm circa a valle dello sbocco con la canaletta B. Si registra anche in questo caso che a 200 s circa dall'inizio dell'acquisizione dati un aumento di livello conseguente all'inizio del deflusso idrico lungo il canale A, e successivamente un aumento di livello, anche se di entità modesta, nell'intervallo temporale compreso tra 750 s e 1200 s al trasporto solido conseguente all'erosione del materiale depositato più a monte. Anche in

questo caso per tempi superiori ai 1200 s si registra un abbassamento di livello dovuto all'arresto del deflusso idrico lungo il canale A.

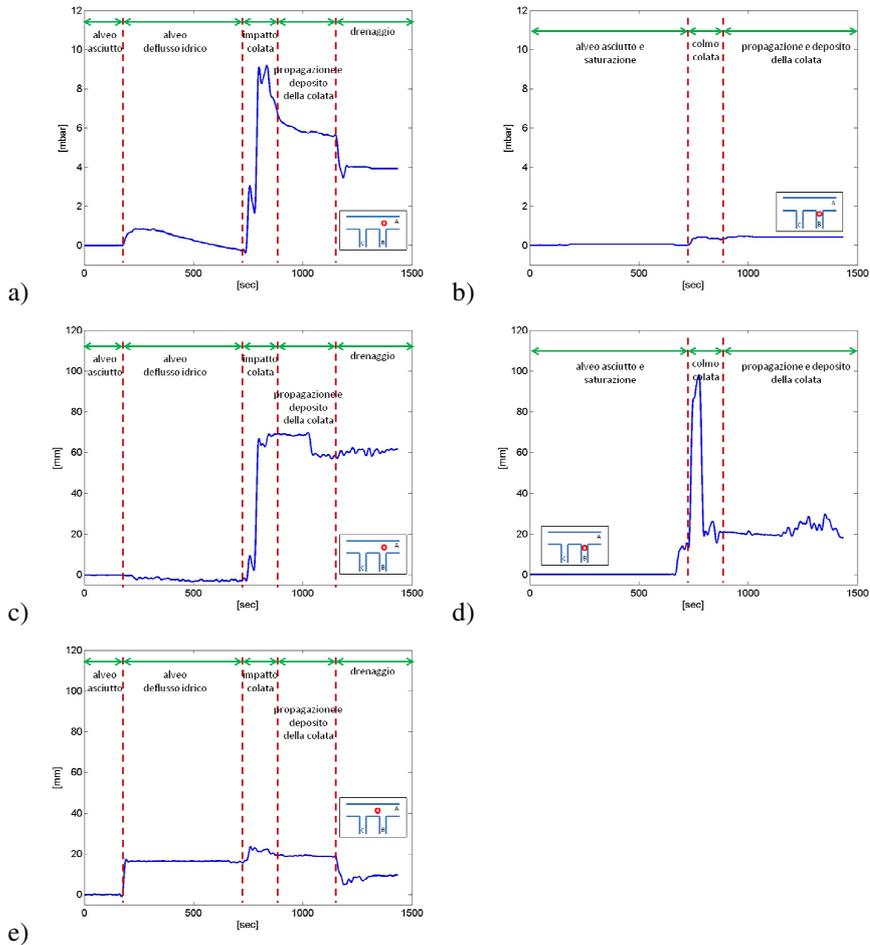


Figura 6.31 Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta B nel canale principale durante la prova 5: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta B; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta B; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.

La Figure 6.32a e la Figura 6.32c illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta A, in prossimità dello sbocco della canaletta C. Analogamente a quanto descritto per la canaletta B, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del

canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 50 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.32a indica che, a circa 200 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, fenomeno conseguente all'inizio del deflusso idrico nel canale A e al contributo della portata di saturazione che filtra attraverso l'ammasso detritico inizialmente collocato nella canaletta C; fenomeno che viene rilevato dalla sonda di livello accoppiata con un leggero andamento ondulatorio (vedi Figura 6.32c). L'inizio del deposito dei sedimenti convogliati dalla colata detritica generata lungo la canaletta C si realizza attorno ai 500 s. Nell'intervallo di tempo tra 500 s e i 800s si osserva un notevole innalzamento dei valori acquisiti sia dalla cella di pressione che dalla sonda di livello, fenomeno conseguente al passaggio dell'onda di piena e al depositarsi del materiale al fondo. In particolare la cella di pressione identifica la fase di deposizione del materiale come composta da due fasi, identificabili dall'andamento del grafico in Figura 6.32a attraverso i due picchi realizzatisi a 600 s e 700 s. Infine nell'intervallo compreso tra i 1200 s e la fine della prova, la pressione al fondo e il livello della superficie subiscono un abbassamento verosimilmente attribuibile al drenaggio dell'ammasso.

La Figura 6.32b e la Figura 6.32d illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 5 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta C, in prossimità dello sbocco. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 20 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.32b indica che, a circa 400 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, verosimilmente attribuibile all'erogazione della portata di saturazione. Mentre in Figura 6.32d si registra che la propagazione della colata viene registrata nella sezione di misura nell'arco temporale compreso tra 500 s e 600 s. Infine nell'intervallo compreso tra i 600 s e la fine della prova, la pressione al fondo subisce un abbassamento nell'andamento registrato verosimilmente attribuibile all'arresto della portata erogata lungo il canale C.

La Figura 6.32e illustra l'andamento della sonda di livello posta lungo il canale A a 75 cm circa a valle dello sbocco con la canaletta C. Si registra anche in questo caso, a 200 s circa dall'inizio dell'acquisizione dati, un aumento di livello conseguente all'inizio del deflusso idrico lungo il canale A, e successivamente un aumento di livello, anche se di entità modesta, nell'intervallo temporale compreso tra 500 s e 800 s al trasporto solido conseguente all'erosione del materiale depositato più a monte. Anche in questo caso per tempi superiori ai 1200 s si registra un abbassamento di livello dovuto all'arresto del deflusso idrico lungo il canale A.

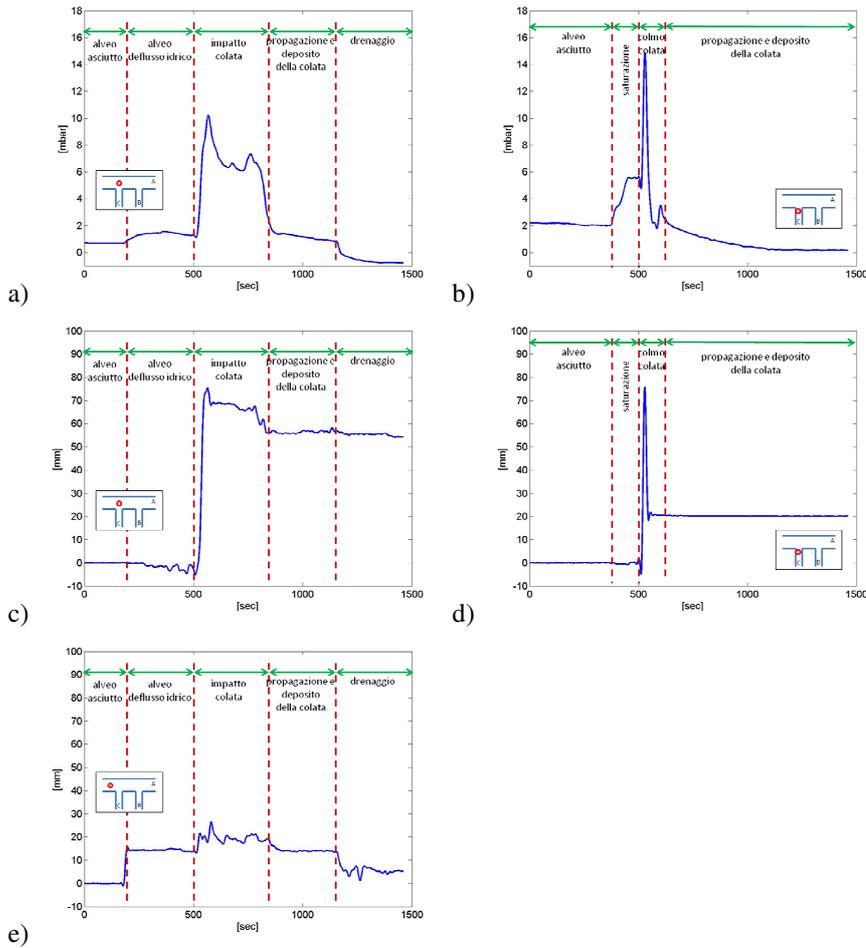


Figura 6.32 Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta C nel canale principale durante la prova 5: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta C; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta C; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.

6.7 Esperimento 6 ($\alpha=50^\circ$, $\beta=17^\circ$, B=C)

L'esperimento no.6 è caratterizzato dai parametri macroscopici e dai parametri idraulici di controllo riportati in Tabella 6.VII. L'inclinazione della canaletta A è stata fissata a 5° e quelle delle canalette B e C a 17° . Lo strato di materiale posto lungo le

canalette laterali è di 10 cm circa e la portata di saturazione degli ammassi è pari a 0.78 l/s, valore strettamente dipendente dalla tipologia di materiale utilizzato e dallo spessore dell'ammasso.

Tabella 6.VII Parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e parametri idraulici adottati nell'esperimento 6: numero d'ordine della prova, portata fluente nella canaletta principale, angolo di confluenza delle canalette laterali e istanti di innesco delle colate e portata di innesco nelle canalette laterali.

N. exp.	canaletta A	canaletta B		canaletta C			
	Portata [l/s]	Angolo di confluenza	t_0 innesco [s]	Portata di innesco [l/s]	Angolo di confluenza	t_0 innesco [s]	Portata di innesco [l/s]
6	5.13	50°	0	3.35	50°	0	3.15

Durante l'esperimento sono stati innescati due differenti fenomeni di colate detritiche, che sono stati innescati contemporaneamente lungo le due canalette laterali (canale B e canale C).

In Figura 6.33, in Figura 6.34 e in Figura 6.35 vengono presentate alcune immagini acquisite alla fine dell'esperimento, in condizioni drenate. In particolare, dalla Figura 6.33 si evincono le forme di deposito realizzatesi lungo il canale A alla fine dell'esperimento. In Figura 6.34a e in Figura 6.34b vengono rappresentate la quantità di materiale eroso durante l'esperimento lungo la canaletta laterale e la forma del deposito allo sbocco per la canaletta B; e in maniera analoga in Figura 6.35a e 6.35b per la canaletta C.



Figura 6.33 Vista generale dei depositi lungo la canaletta A in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.6 ad esperimento concluso.

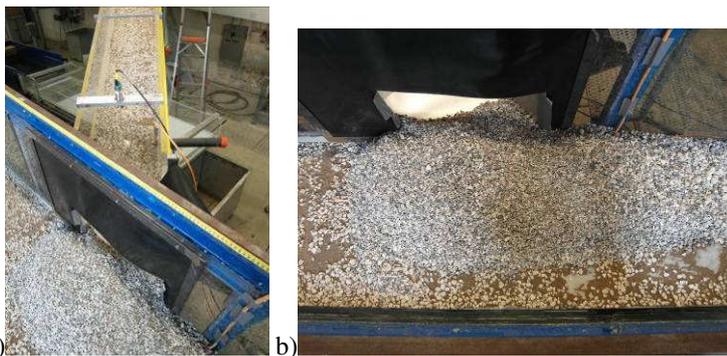


Figura 6.34 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.6 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta B; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta B.



Figura 6.35 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.6 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta C; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta C.

Da queste immagini si osservano i fenomeni di deposito a valle delle canalette B e C: si nota in particolare, come si sia realizzata lungo il canale A un'interazione tra i depositi. In particolare, l'interazione si è realizzata lungo tutto il tratto di canale A compreso tra le due sezioni di sbocco delle colate interessando la sezione idrica del canale per una estensione lineare di circa 20 cm a partire dalla parete dove sono collocati gli sbocchi stessi. Entrambi i depositi presentano uguale forma anche se il deposito sbocco del canale C appare di minore volumetria se confrontato con quello formatosi a valle della canaletta B (vedi Figura 6.34b e Figura 3.35b), fenomeno che può essere attribuibile al non coinvolgimento di tutto il materiale a disposizione per quanto riguarda la colata generata lungo il canale C (Figura 3.35a). Mentre per quanto concerne il fenomeno di colata innescato lungo la canaletta B si nota che tutto il materiale a disposizione sia stato coinvolto anche se si rileva la presenza di un deposito di entità modeste nella porzione valliva (Figura 6.34a). L'erosione del deposito allo sbocco del canale B ha generato un trasporto solido lungo il canale A che ha interagito con il deposito sedimentatosi a valle della canaletta C, determinando la formazione

continua di deposito lungo il tratto di canale che collega i due sbocchi delle canalette laterali (canale B e canale C).

La ricostruzione dei depositi nella canaletta A ottenuta per mezzo di rilievi effettuati con asta graduata viene riportata in Figura 6.36; anche in questo caso si nota l'interazione tra i depositi e il maggiore volume del deposito allo sbocco della canaletta B rispetto a quello formatosi allo sbocco della canaletta C.

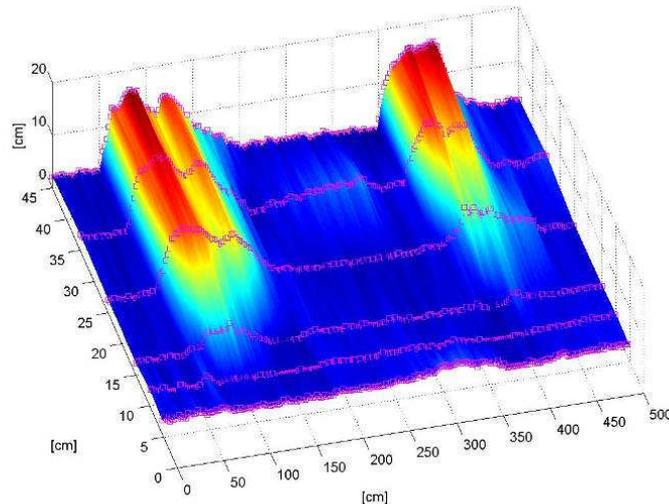


Figura 6.36 Ricostruzione tridimensionale dei depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.6.

In Figura 6.37 e in Figura 6.38 si riportano gli andamenti della variazione della pressione e del livello nel tempo entrambi registrati in funzione della propagazione del fenomeno di colata.

Le Figure 6.37a e 6.37c illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 6 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta A, in prossimità dello sbocco della canaletta B. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 50 cm. L'accoppiamento tra la sonda di livello e la cella di pressione consente di cogliere alcuni interessanti aspetti della dinamica che caratterizza l'evoluzione e il deposito della colata.

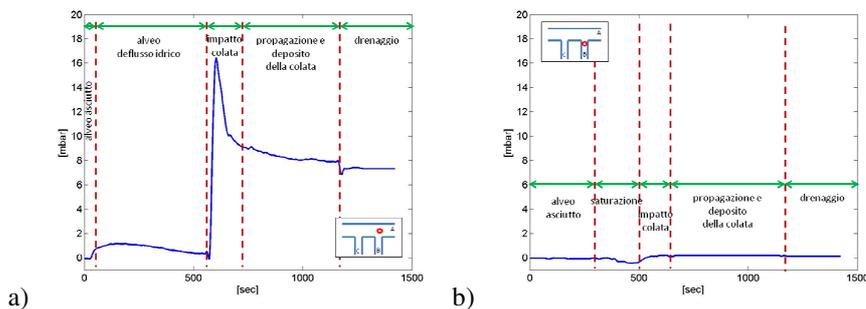
L'andamento del grafico in Figura 6.37a indica che, a circa 60 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, tale fenomeno è verosimilmente attribuibile all'erogazione di portata nel canale principale (A). L'inizio del deposito dei sedimenti convogliati dalla colata detritica, generata lungo la canaletta B, si realizza attorno ai 570s. Nell'intervallo di tempo compreso tra i 570 s e i 740 s, si registra un notevole innalzamento dei valori acquisiti sia dalla cella di pressione che dalla sonda di livello (Figura 6.37a e Figura 6.37c). In particolare, la cella di pressione (Figura 6.37a) evidenzia, l'impatto dinamico della colata detritica sul fondo durante la

fase di progressivo accrescimento del deposito individuabile in Figura 6.37a nella fase di picco a circa 600 s.

Infine nell'intervallo compreso tra i 740 s e i 1300s, la pressione al fondo e il livello della superficie presentano un andamento pressoché stazionario verosimilmente attribuibile all'equilibrio dinamico del fenomeno di deposizione, mentre da 1300 s fino alla fine dell'esperimento si osserva un abbassamento nell'andamento delle pressioni (Figura 6.37a) conseguente alla fase di drenaggio dell'ammasso.

La Figura 6.37b e la Figura 6.37d illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 6 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta B, in prossimità dello sbocco. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 20 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.37b indica che, nell'intervallo compreso tra i 300 s e i 500 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un abbassamento di pressione, verosimilmente attribuibile alla saturazione dell'ammasso. In Figura 6.37d si registra che la propagazione della colata viene registrata nella sezione di misura nell'arco temporale compreso tra 500 s e 1300 s, inoltre si evidenzia che il colmo della colata nella sezione viene raggiunto a 600 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati.

La Figura 6.37e illustra l'andamento della sonda di livello posta lungo il canale A a 75 cm circa a valle dello sbocco con la canaletta B. Si registra anche in questo caso che a 60 s circa dall'inizio dell'acquisizione dati un aumento di livello conseguente all'inizio del deflusso idrico lungo il canale A. Successivamente si nota un ulteriore aumento di livello nell'intervallo temporale compreso tra 570 s e la fine dell'acquisizione dati dove si evidenzia la fase di propagazione e deposito del materiale sulla sezione di misura, in particolare a 600 s dall'inizio dell'acquisizione dati si evidenzia in Figura 6.37e l'impatto della colata.



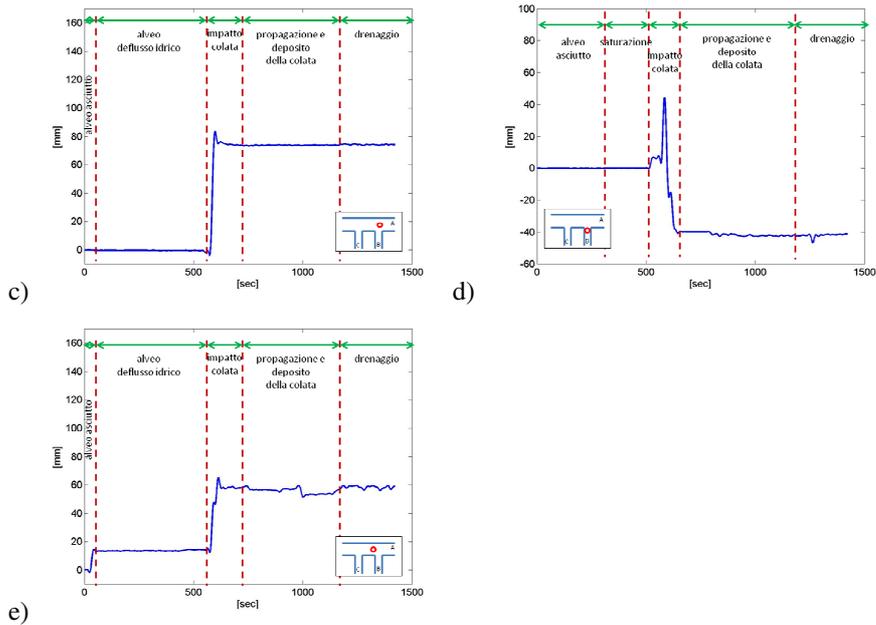


Figura 6.37 Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta B nel canale principale durante la prova 6: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta B; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta B; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.

La Figura 6.38a e la Figura 6.38c illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta A, in prossimità dello sbocco della canaletta C. Analogamente a quanto descritto per la canaletta B, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 50 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.38a indica che, a circa 60 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, fenomeno conseguente all'inizio del deflusso idrico nel canale A e al contributo della portata di saturazione che filtra attraverso l'ammasso detritico inizialmente collocato nella canaletta C; fenomeno che viene rilevato dalla sonda di livello accoppiata con un leggero andamento ondulatorio (vedi Figura 6.38c). L'inizio del deposito dei sedimenti convogliati dalla colata detritica generata lungo la canaletta C si realizza attorno ai 570 s. L'impatto della colata viene registrato nella sezione di misura a circa 600 s dall'inizio dell'acquisizione dati. Nell'intervallo di tempo tra 900 s e i 1250 s si osserva, sia dalla cella di pressione che dalla sonda di livello, un andamento oscillatorio caratteristico della propagazione della colata composto da fasi di erosione e deposito. Infine nell'intervallo compreso tra i

1250 s e la fine della prova, la pressione al fondo subisce un abbassamento verosimilmente attribuibile al drenaggio dell'ammasso.

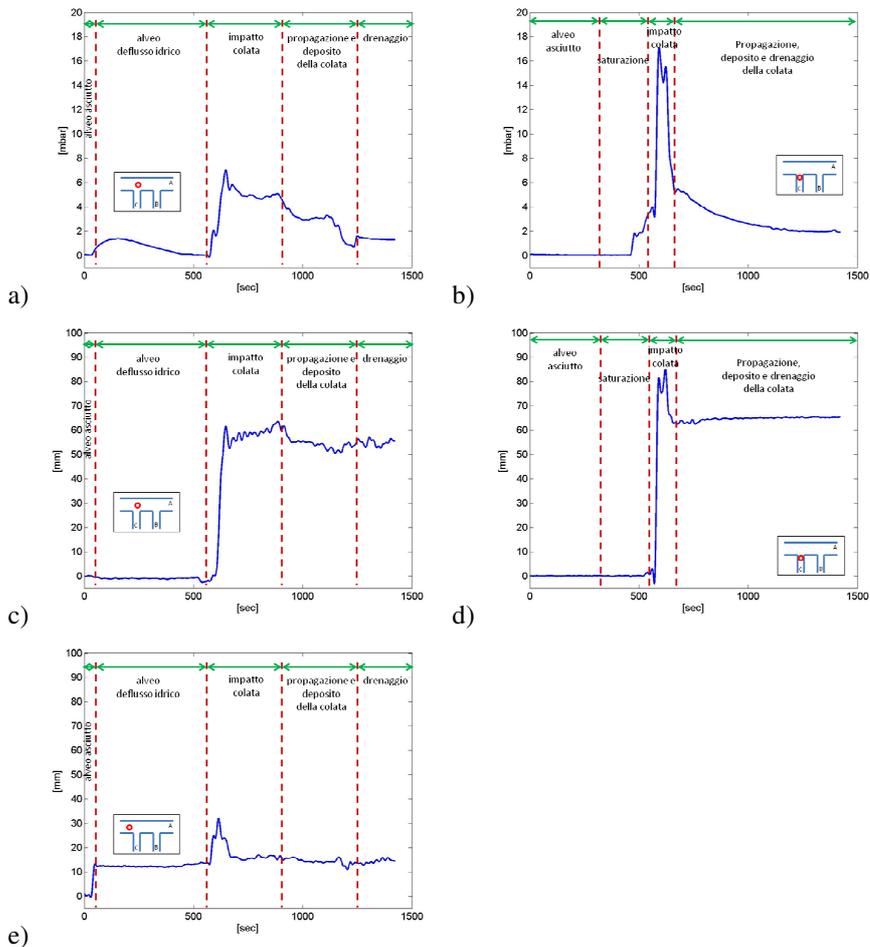


Figura 6.38 Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta C nel canale principale durante la prova 6: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta C; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta C; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.

La Figura 6.38b e la Figura 6.38d illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 6 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta C, in prossimità dello sbocco. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad

ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 20 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.38b indica che, a circa 400 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, verosimilmente attribuibile all'erogazione della portata di saturazione. Il passaggio del colmo caratteristico della propagazione della colata viene registrato, sia dalla cella di pressione che dal sensore di livello (Figura 6.38b e Figura 6.38d) nella sezione di misura nell'arco temporale compreso tra 600 s e 700 s. Infine nell'intervallo compreso tra i 700 s e la fine della prova, si nota un andamento costante dei livelli e quindi una condizione stazionaria del deposito, mentre la pressione al fondo subisce un abbassamento verosimilmente attribuibile all'arresto della portata erogata lungo il canale C.

La Figura 6.38e illustra l'andamento della sonda di livello posta lungo il canale A a 75 cm circa a valle dello sbocco con la canaletta C. Si registra anche in questo caso, a 60 s circa dall'inizio dell'acquisizione dati, un aumento di livello conseguente all'inizio del deflusso idrico lungo il canale A, e successivamente un aumento di livello, anche se di entità modesta, nell'intervallo temporale compreso tra 570 s e 1250 s al trasporto solido conseguente all'erosione del materiale depositato più a monte. Anche in questo caso per tempi superiore ai 1250 s si registra un abbassamento di livello dovuto all'arresto del deflusso idrico lungo il canale A.

6.8 Esperimento 7 ($\alpha=50^\circ$, $\beta=17^\circ$, B=C)

L'esperimento no.7 è caratterizzato dai parametri macroscopici e dai parametri idraulici di controllo riportati in Tabella 6.VIII. L'inclinazione della canaletta A è stata fissata a 5° e quelle delle canalette B e C a 17° . Lo strato di materiale posto lungo le canalette laterali è di 10 cm circa e la portata di saturazione degli ammassi è pari a 0.78 l/s, valore strettamente dipendente dalla tipologia di materiale utilizzato e dallo spessore dell'ammasso. In questo caso rispetto al caso esaminato precedentemente è stata aumentata il valore di portata di deflusso lungo il canale A.

Tabella 6.VIII Parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e parametri idraulici adottati nell'esperimento 7: numero d'ordine della prova, portata fluente nella canaletta principale, angolo di confluenza delle canalette laterali e istanti di innesco delle colate e portata di innesco nelle canalette laterali.

N. exp.	canaletta A	canaletta B			canaletta C		
	Portata [l/s]	Angolo di confluenza	t_0 Innesco [s]	Portata di innesco [l/s]	Angolo di Confluenza	t_0 innesco [s]	Portata di innesco [l/s]
7	6	50°	0	3.35	50°	0	3.15

La prova è stata condotta effettuando l'innesco contemporaneo lungo i canali B e C. In Figura 6.39 viene rappresentata l'acquisizione panoramica con vista dall'alto del deposito di materiale disposto lungo il canale A a fine esperimento e in condizione drenate.

La ricostruzione dei depositi nella canaletta A ottenuta per mezzo di rilievi effettuati con asta graduata viene riportata in Figura 6.40. In questo caso si vince

l'interazione tra i depositi che la maggiore estensione e il maggiore volume del deposito allo sbocco della canaletta B rispetto a quello formatosi allo sbocco della canaletta C. Aspetto dovuto al non totale coinvolgimento del materiale disposto lungo il canale C durante l'esecuzione della prova. Dalla ricostruzione del deposito lungo il canale A si evidenzia una interazione tra gli sbocchi data dal materiale depositatosi subito a monte dello sbocco del canale C. L'interferenza osservata è verosimilmente dovuta all'ipotesi di base sulla tempistica di innesco, scegliendola alla base dell'esperimento la condizione con propagazione contemporanea dei fenomeni di colata lungo i canali B e C.



Figura 6.39 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.7 ad esperimento concluso per l'intera estensione del canale A.

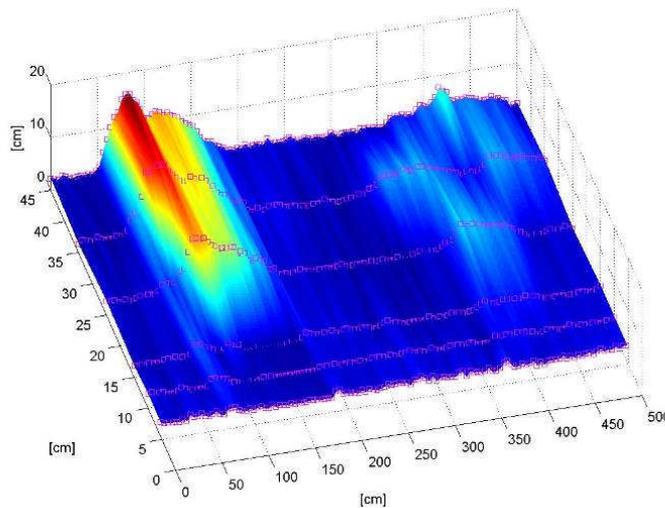


Figura 6.40 Ricostruzione tridimensionale dei depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.7.

6.9 Esperimento 8 ($\alpha=50^\circ$, $\beta=15^\circ$, B->C)

L'esperimento no.8 è caratterizzato dai parametri macroscopici e dai parametri idraulici di controllo riportati in Tabella 6.IX. L'inclinazione della canaletta A è stata fissata a 5° e quelle delle canalette B e C a 15° . Lo strato di materiale posto lungo le canalette laterali è di 10 cm circa e la portata di saturazione degli ammassi è pari a 0.78 l/s, valore strettamente dipendente dalla tipologia di materiale utilizzato e dallo spessore dell'ammasso.

Tabella 6.IX Parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e parametri idraulici adottati nell'esperimento 8: numero d'ordine della prova, portata fluente nella canaletta principale, angolo di confluenza delle canalette laterali e istanti di innesco delle colate e portata di innesco nelle canalette laterali.

N. exp.	canaletta A	canaletta B		canaletta C			
	Portata [l/s]	Angolo di confluenza	t_0 Innesco [s]	Portata di innesco [l/s]	Angolo di confluenza	t_0 innesco [s]	Portata di innesco [l/s]
8	5.00	50°	0	3.35	50°	210	3.15

Durante l'esperimento si sono innescati due differenti colate detritiche. Inizialmente si è innescata la colata lungo la canaletta di monte (canaletta B) e successivamente, dopo circa 3 minuti e mezzo, si è innescata la colata nella canaletta a valle (Canale C).

Nelle Figure 6.41-6.44 vengono presentate alcune immagini acquisite alla fine dell'esperimento, in condizioni drenate. In particolare, dalla Figura 6.41 e dalla Figura 6.42 si evincono le forme di deposito allo stadio finale per l'intera estensione del canale A rispettivamente con una vista dall'alto e in sezione. In Figura 6.43a e in Figura 6.43b vengono rappresentate la quantità di materiale eroso durante l'esperimento lungo la canaletta laterale e la forma del deposito allo sbocco per la canaletta B; e in maniera analoga in Figura 6.44a e in Figura 6.44b per la canaletta C.



Figura 6.41 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.8 ad esperimento concluso per l'intera estensione del canale A.



Figura 6.42 Vista generale dei depositi lungo la canaletta A in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.8 ad esperimento concluso.

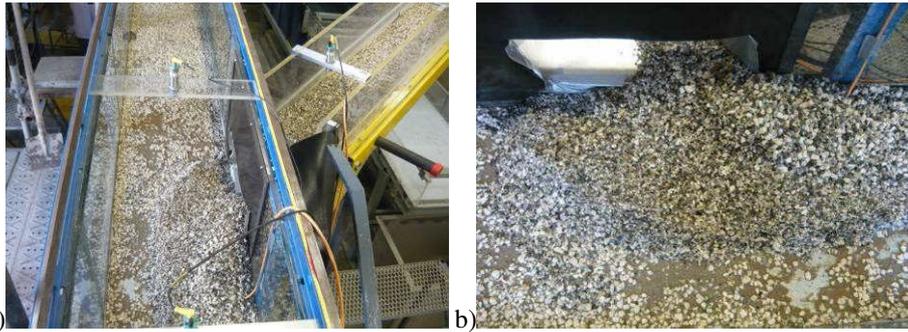


Figura 6.43 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.8 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta B; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta B.

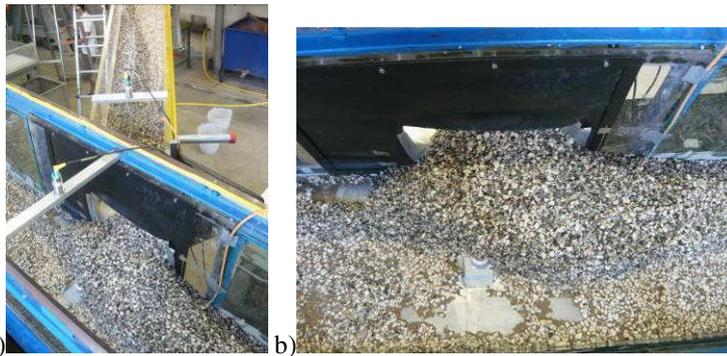


Figura 6.44 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.8 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta C; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta C.

Da queste immagini si osservano i fenomeni di deposito a valle delle canalette B e C: si osserva, in particolare, l'interazione tra i fenomeni di deposito, condizione resa evidente in Figura 6.41 e in Figura 6.42 dove si nota chiaramente come l'erosione del deposito a valle della canaletta B abbia interagito in parte con il deposito della canaletta C. La portata defluente lungo il canale A ha comunque effettuato una azione erosiva e di trasporto del materiale eroso e pervenuto lungo le canalette B e C, tanto è vero che a valle si sono riscontrati importati depositi di materiale (vedi Figura 6.41). Inoltre appare opportuno far notare come i fenomeni di colata innescati non abbiano coinvolto tutto il materiale a disposizione. Infatti si vede come sia rimasto parte del materiale nella zona valliva della canaletta (Figura 6.43a), mentre per la canaletta C il materiale a disposizione è coinvolto solo parzialmente dal fenomeno di colata (Figura 6.44a).

La ricostruzione dei depositi nella canaletta A ottenuta per mezzo di rilievi effettuati con asta graduata viene riportata in Figura 6.45. In questo caso si evince l'interazione tra i depositi che la maggiore estensione e il maggiore volume del deposito allo sbocco della canaletta B rispetto a quello formatosi allo sbocco della canaletta C.

Fenomeno attribuibile al non totale coinvolgimento di materiale durante lo sviluppo della colata generata lungo la canaletta C.

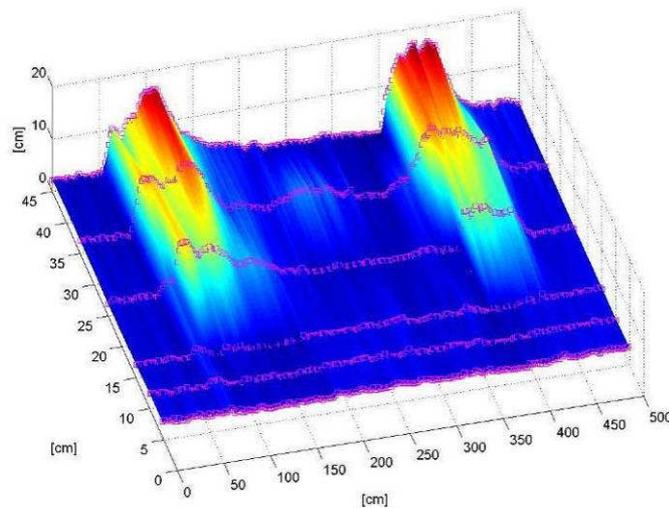


Figura 6.45 Ricostruzione tridimensionale dei depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.8.

In Figura 6.46 e in Figura 6.47 si riportano gli andamenti della variazione della pressione e del livello nel tempo entrambi registrati in funzione della propagazione del fenomeno di colata.

La Figura 6.46a e la Figura 6.46c illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 8 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta A, in prossimità dello sbocco della canaletta B. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 50 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.46a indica che, a circa 300 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, della durata di circa 300 s. Tale fenomeno è verosimilmente attribuibile all'aumento di portata nel canale principale (A) dovuto al contributo della portata di saturazione che filtra attraverso l'ammasso detritico inizialmente collocato nella canaletta C. Tale fenomeno invece viene avvertito dalla sonda di livello accoppiata con un leggero andamento ondulatorio (vedi Figura 6.46c). L'inizio del deposito dei sedimenti convogliati dalla colata detritica, generata lungo la canaletta B, si realizza attorno ai 600s. Nell'intervallo di tempo tra 600 s e 1200 s si osserva un notevole innalzamento dei valori acquisiti sia dalla cella di pressione che dalla sonda di livello. In particolare, la cella di pressione evidenzia, l'impatto dinamico della colata detritica sul fondo durante la fase di progressivo accrescimento del deposito individuato da un picco di pressione registrato a 680 s. Nell'intervallo di tempo tra 800 s e 1200 s si osserva un comportamento abbastanza stazionario del deposito, verosimilmente legato all'alternarsi di fasi di accrescimento e erosione del deposito in equilibrio dinamico tra loro. Infine nell'intervallo compreso tra

i 1200 s e la fine della prova, la pressione al fondo subisce un abbassamento verosimilmente attribuibile al drenaggio dell'ammasso.

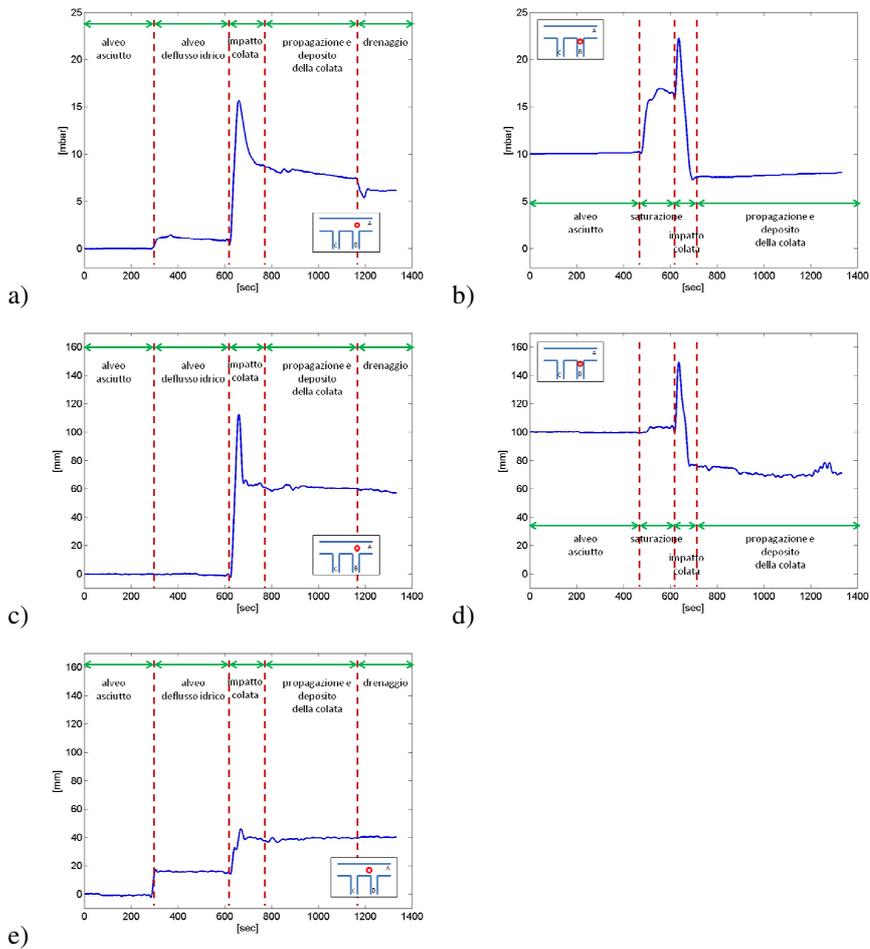


Figura 6.46 Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta B nel canale principale durante la prova 8: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta B; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta B; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.

La Figura 6.46b e la Figura 6.46d illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 8 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta B, in prossimità dello sbocco. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad

ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 20 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.46b indica che, a circa 480 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, verosimilmente attribuibile all'erogazione della portata di saturazione e successivamente all'innescò della colata. Mentre in Figura 6.46d si registra che la propagazione della colata viene registrata nella sezione di misura nell'arco temporale compreso tra 600 s e 1350 s, il passaggio del colmo della propagazione della colata viene rilevato nella sezione di misura a 650 s dall'inizio dell'acquisizione dati.

La Figura 6.46e illustra l'andamento della sonda di livello posta lungo il canale A a 75 cm circa a valle dello sbocco con la canaletta B. Si registra anche in questo caso che a 300 s circa dall'inizio dell'acquisizione dati un aumento di livello conseguente all'inizio del deflusso idrico lungo il canale A, e successivamente un aumento di livello, anche se di entità modesta, nell'intervallo temporale compreso tra 600s e 800 s al trasporto solido conseguente all'erosione del materiale depositato più a monte.

La Figure 6.47a e la Figura 6.47c illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta A, in prossimità dello sbocco della canaletta C. Analogamente a quanto descritto per la canaletta B, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 50 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.47a indica che, a circa 300 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, fenomeno conseguente all'inizio del deflusso idrico nel canale A. L'inizio del deposito dei sedimenti convogliati dalla colata detritica, generata lungo la canaletta C, si realizza attorno ai 600s. Nell'intervallo di tempo tra 600 s e 1200 s si osserva un notevole innalzamento dei valori acquisiti sia dalla cella di pressione che dalla sonda di livello, fenomeno conseguente al passaggio dell'onda di piena, l'impatto della colata si registra a circa 800 s dall'inizio di acquisizione dei dati. Infine nell'intervallo compreso tra i 1200 s e la fine della prova, la pressione al fondo e il livello della superficie subiscono un abbassamento verosimilmente attribuibili al drenaggio dell'ammasso.

La Figure 6.47b e la Figura 6.47d illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 4 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta C, in prossimità dello sbocco. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 20 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.47b e quello in Figura 6.47d indicano che, a circa 300 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, verosimilmente attribuibile alla fase di saturazione dell'ammasso. La propagazione della colata viene registrata nella sezione di misura nell'arco temporale compreso tra 750 s e 1300 s, mentre il passaggio del colmo dell'onda di propagazione della colata avviene a circa 800 s.

La Figura 6.47e illustra l'andamento della sonda di livello posta lungo il canale A a 75 cm circa a valle dello sbocco con la canaletta C. Si registra anche in questo caso, a 300 s circa dall'inizio dell'acquisizione dati, un aumento di livello conseguente all'inizio del deflusso idrico lungo il canale A, e successivamente un aumento di livello, anche se di entità modesta, nell'intervallo temporale compreso tra 600s e 1300 s conseguente al trasporto solido e all'erosione del materiale depositato più a monte.

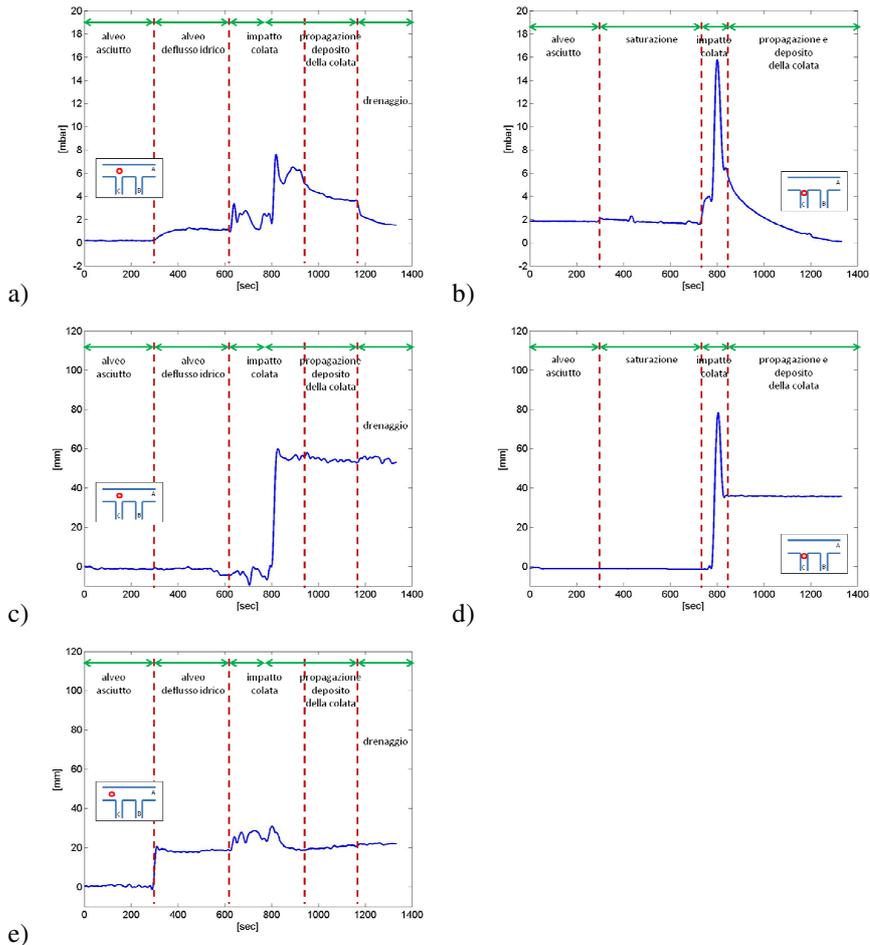


Figura 6.47 Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta C nel canale principale durante la prova 8: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta C; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta C; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.

6.10 Esperimento 9 ($\alpha=50^\circ$, $\beta=15^\circ$, C->B)

L'esperimento no.9 è caratterizzato dai parametri macroscopici e dai parametri idraulici di controllo riportati in Tabella 6.X. L'inclinazione della canaletta A è stata fissata a 5° e quelle delle canalette B e C a 15° . Lo strato di materiale posto lungo le

canalette laterali è di 10 cm circa e la portata di saturazione degli ammassi è pari a 0.78 l/s, valore strettamente dipendente dalla tipologia di materiale utilizzato e dallo spessore dell'ammasso.

Tabella 6.X Parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e parametri idraulici adottati nell'esperimento 9: numero d'ordine della prova, portata fluente nella canaletta principale, angolo di confluenza delle canalette laterali e istanti di innesco delle colate e portata di innesco nelle canalette laterali.

N. exp.	canaletta A	canaletta B		canaletta C			
	Portata [l/s]	Angolo di confluenza	t_0 innesco [s]	Portata di innesco [l/s]	Angolo di confluenza	t_0 innesco [s]	Portata di innesco [l/s]
9	5.00	50°	227	3.35	50°	0	3.15

Durante l'esperimento sono stati innescati due differenti fenomeni di colate detritiche, il primo ha interessato la canaletta di valle (canale C) e dopo circa 3 minuti e mezzo è stato innescato invece il fenomeno di colata detritica lungo la canaletta a monte (canale B).

In Figura 6.48, in Figura 6.49 e in Figura 6.50 vengono presentate alcune immagini acquisite alla fine dell'esperimento, in condizioni drenate. In particolare, dalla Figura 6.48 si evincono le forme di deposito realizzatesi lungo il canale A alla fine dell'esperimento. In Figura 6.49a e in Figura 6.49b vengono rappresentate la quantità di materiale eroso durante l'esperimento lungo la canaletta laterale e la forma del deposito allo sbocco per la canaletta B; e in maniera analoga in Figura 6.50a e in Figura 6.50b per la canaletta C.



Figura 6.48 Vista generale dei depositi lungo la canaletta A in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.9 ad esperimento concluso.

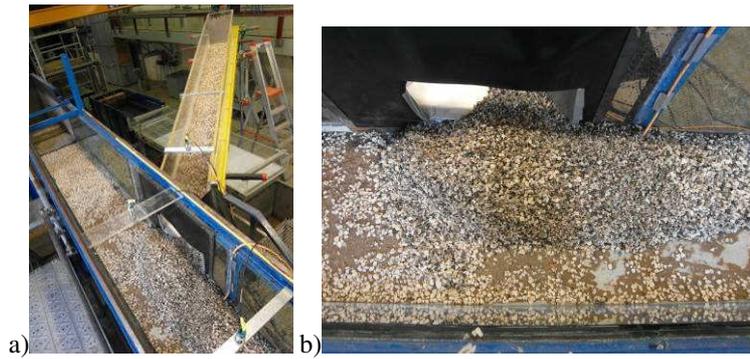


Figura 6.49 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.9 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta B; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta B.

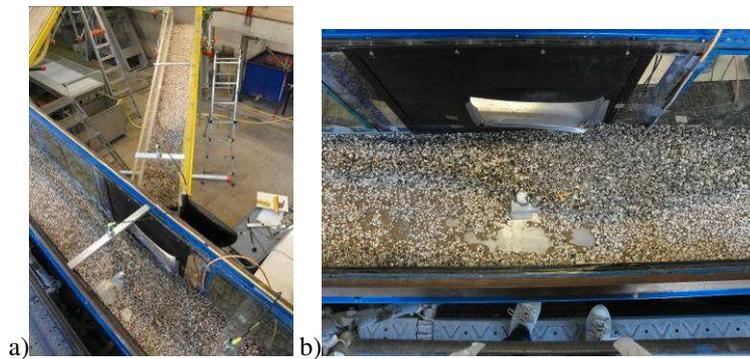


Figura 6.50 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.9 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta C; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta C.

Da queste immagini si osservano i fenomeni di deposito a valle delle canalette B e C: si nota in particolare, come si sia realizzata lungo il canale A un'interazione tra i depositi con estensione lineare lungo la sezione del canale a partire dalla parete in cui sono collocati gli sbocchi di circa 20 cm. Il deposito a valle della canaletta C è stato quello maggiormente eroso dalla portata che defluiva lungo il canale A, esso appare meno esteso se confrontato con quello formatosi a valle della canaletta B (vedi Figura 6.49b e Figura 6.50b). L'erosione del deposito allo sbocco del canale B ha generato un trasporto solido lungo il canale A che ha interagito con il deposito sedimentatosi a valle della canaletta C, determinando un deposito di forma allungata a monte del deposito allo sbocco della canaletta C. Inoltre appare opportuno far notare come entrambi i fenomeni di colata innescati abbiano coinvolto pressoché tutto il materiale a disposizione (Figura 6.49a e Figura 6.50a), anche se una quantità minima di materiale è rimasta depositata nella zona valliva delle due canalette.

La ricostruzione dei depositi nella canaletta A ottenuta per mezzo di rilievi effettuati con asta graduata viene riportata in Figura 6.51; anche in questo caso si nota l'interazione tra i depositi e la maggiore estensione e volume del deposito allo sbocco della canaletta B rispetto a quello formatosi allo sbocco della canaletta C.

Dal confronto delle immagini (Figura 6.48) e del rilievo effettuato (Figura 6.51) è subito evidente come il deposito a valle della canaletta C è di minor volume rispetto a quello della canaletta B.

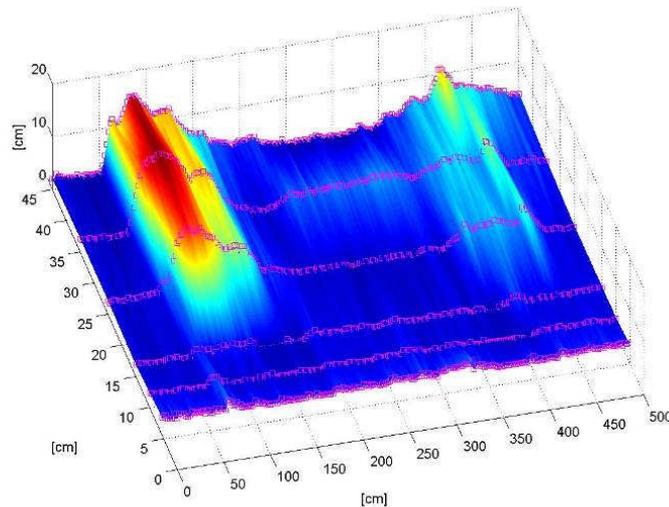


Figura 6.51 Ricostruzione tridimensionale dei depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.9.

In Figura 6.52 e in Figura 6.53 si riportano gli andamenti della variazione della pressione e del livello nel tempo entrambi registrati in funzione della propagazione del fenomeno di colata.

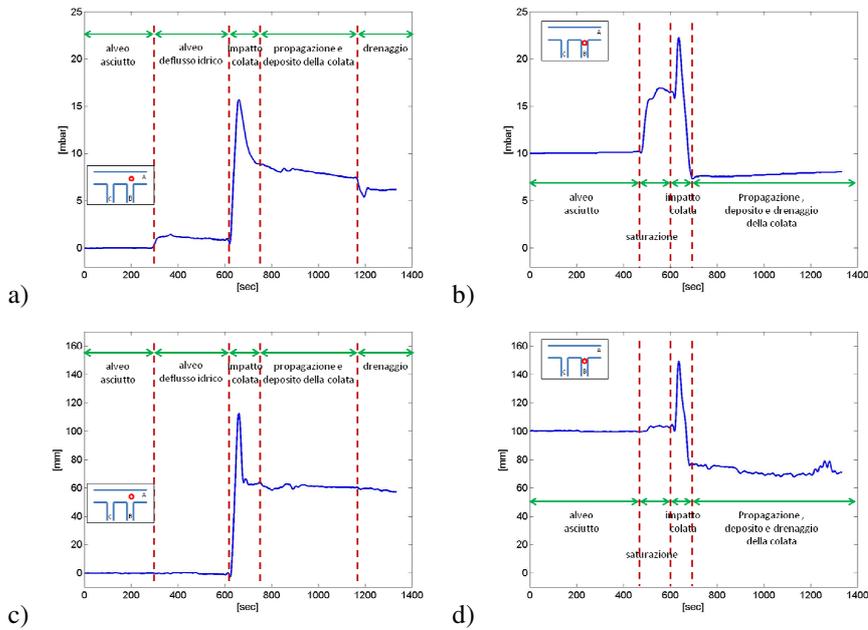
La Figura 6.52a e Figura 6.52c illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 9 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta A, in prossimità dello sbocco della canaletta B. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 50 cm.

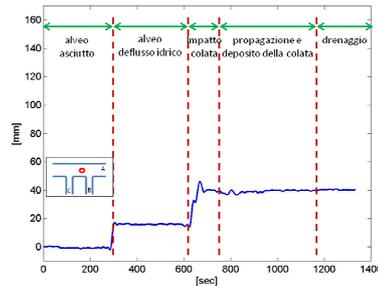
L'andamento del grafico in Figura 6.52a indica che, a circa 300 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, tale fenomeno è verosimilmente attribuibile all'erogazione di portata nel canale principale (A). L'inizio del deposito dei sedimenti convogliati dalla colata detritica, generata lungo la canaletta B, si realizza intorno ai 600s. Nell'intervallo di tempo compreso tra i 600 s e i 1200 s, si registra un notevole innalzamento dei valori acquisiti sia dalla cella di pressione che dalla sonda di livello (Figura 6.52a e Figura 6.52c). In particolare, la cella di pressione (Figura 6.52 a) evidenzia l'impatto dinamico della colata detritica sul fondo individuato da un picco di pressione registrato a 670 s dall'inizio di acquisizione dei dati. Infine nell'intervallo compreso tra i 800 s e i 1200s, si osserva un comportamento

intermittente del deposito, verosimilmente legato all'alternarsi di fasi di accrescimento e parziale erosione; mentre da 1200 s fino alla fine dell'esperimento si osserva attraverso l'andamento registrato dalla cella di pressione la fase di drenaggio dell'ammasso.

La Figura 6.52b e la Figura 6.52d illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 9 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta B, in prossimità dello sbocco. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 20 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.52b indica che, a circa 470 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un innalzamento di pressione, verosimilmente attribuibile all'innesco della colata e all'inizio della propagazione della stessa, con conseguente erosione dell'ammasso collocato sul fondo della canaletta B. Anche in Figura 6.52d si registra che la propagazione della colata viene registrata nella sezione di misura nell'arco temporale compreso tra 470 s e 1300 s, inoltre si evidenzia che il colmo della colata nella sezione viene raggiunto a 650 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati.

La Figura 6.52e illustra l'andamento della sonda di livello posta lungo il canale A a 75 cm circa a valle dello sbocco con la canaletta B. Si registra anche in questo caso che a 300 s circa dall'inizio dell'acquisizione dati un aumento di livello conseguente all'inizio del deflusso idrico lungo il canale A, e successivamente un aumento di livello, anche se di entità modesta, nell'intervallo temporale compreso tra 600 s e 1300 s al trasporto solido conseguente all'erosione del materiale depositato più a monte.





e)

Figura 6.52 Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta B nel canale principale durante la prova 9: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta B; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta B; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.

La Figura 6.53a e la Figura 6.53c illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta A, in prossimità dello sbocco della canaletta C. Analogamente a quanto descritto per la canaletta B, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 50 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.53a indica che, a circa 300 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, fenomeno conseguente all'inizio del deflusso idrico nel canale A e al contributo della portata di saturazione che filtra attraverso l'ammasso detritico inizialmente collocato nella canaletta C; fenomeno che viene rilevato dalla sonda di livello accoppiata con un leggero andamento ondulatorio (vedi Figura 6.53c). L'inizio del deposito dei sedimenti convogliati dalla colata detritica generata lungo la canaletta C si realizza attorno ai 600 s. Nell'intervallo di tempo tra 600 s e i 1300 s si osserva un notevole innalzamento dei valori acquisiti sia dalla cella di pressione che dalla sonda di livello, fenomeno conseguente al passaggio dell'onda di piena e al depositarsi del materiale al fondo. In particolare la cella di pressione identifica la fase di deposizione del materiale come composta da due fasi, identificabili dall'andamento del grafico in Figura 6.53 attraverso i due picchi realizzatisi a 700 s e 880 s. Infine nell'intervallo compreso tra i 1300 s e la fine della prova, la pressione al fondo e il livello della superficie subiscono un abbassamento verosimilmente attribuibili al drenaggio dell'ammasso.

La Figura 6.53b e la Figura 6.53d illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 9 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta C, in prossimità dello sbocco. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 20 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.53b indica che, a circa 500 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, verosimilmente attribuibile all'erogazione della portata di saturazione. Mentre in Figura 6.53d si registra che la propagazione della colata viene

registrata nella sezione di misura nell'arco temporale compreso tra 600 s e 1250 s. Infine nell'intervallo compreso tra i 1250 s e la fine della prova, la pressione al fondo subisce un abbassamento nell'andamento registrato verosimilmente attribuibile all'arresto della portata erogata lungo il canale C.

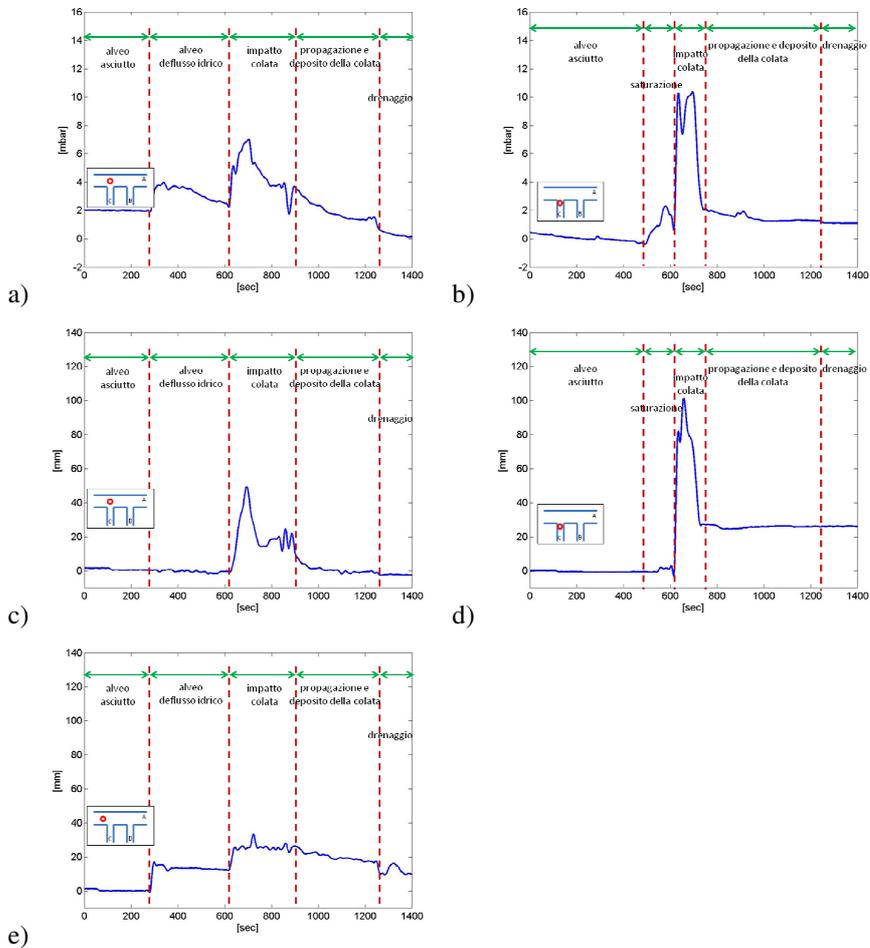


Figura 6.53 Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta C nel canale principale durante la prova 9: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta C; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta C; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.

La Figura 6.53e illustra l'andamento della sonda di livello posta lungo il canale A a 75 cm circa a valle dello sbocco con la canaletta C. Si registra anche in questo caso, a 300 s circa dall'inizio dell'acquisizione dati, un aumento di livello conseguente

all'inizio del deflusso idrico lungo il canale A, e successivamente un aumento di livello, anche se di entità modesta, nell'intervallo temporale compreso tra 300 s e 1300 s al trasporto solido conseguente all'erosione del materiale depositato più a monte. Anche in questo caso per tempi superiore ai 1300 s si registra un abbassamento di livello dovuto all'arresto del deflusso idrico lungo il canale A.

6.11 Esperimento 10 ($\alpha=60^\circ$, $\beta=15^\circ$, B=C)

L'esperimento no.10 è caratterizzato dai parametri macroscopici e dai parametri idraulici di controllo riportati in Tabella 6.XI. L'inclinazione della canaletta A è stata fissata a 5° e quelle delle canalette B e C a 15° . Lo strato di materiale posto lungo le canalette laterali è di 10 cm circa e la portata di saturazione degli ammassi è pari a 0.78 l/s, valore strettamente dipendente dalla tipologia di materiale utilizzato e dallo spessore dell'ammasso.

Tabella 6.XI Parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e parametri idraulici adottati nell'esperimento 10: numero d'ordine della prova, portata fluente nella canaletta principale, angolo di confluenza delle canalette laterali e istanti di innesco delle colate e portata di innesco nelle canalette laterali.

N. exp.	canaletta A	canaletta B			canaletta C		
	Portata [l/s]	Angolo di confluenza	t_0 innesco [s]	Portata di innesco [l/s]	Angolo di confluenza	t_0 innesco [s]	Portata di innesco [l/s]
10	5.08	60°	0	2.83	60°	0	2.78

Durante l'esperimento sono stati innescati due differenti fenomeni di colate detritiche, che si sono propagati contemporaneamente lungo le due canalette laterali (canale B e canale C).

In Figura 6.54, in Figura 6.55, in Figura 6.56 e in Figura 6.57 vengono presentate alcune immagini acquisite alla fine dell'esperimento, in condizioni drenate. In particolare, dalla Figura 6.54 e dalla Figura 6.55 si evincono le forme di deposito realizzatesi lungo il canale A alla fine dell'esperimento rispettivamente con vista complessiva dall'alto e con vista in sezione del canale. In Figura 6.56a e in Figura 6.56b vengono rappresentate la quantità di materiale eroso durante l'esperimento lungo la canaletta laterale e la forma del deposito allo sbocco per la canaletta B; e in maniera analoga in Figura 6.57a e in Figura 6.57b per la canaletta C.



Figura 6.54 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.10 ad esperimento concluso per l'intera estensione del canale A.



Figura 6.55 Vista generale dei depositi lungo la canaletta A in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.10 ad esperimento concluso.



Figura 6.56 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.10 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta B; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta B.



Figura 6.57 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.10 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta C; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta C.

Da queste immagini si osservano i fenomeni di deposito a valle delle canalette B e C: si nota in particolare, come si sia realizzata lungo il canale A un'interazione tra i depositi. In particolare, l'interazione si è realizzata lungo tutto il tratto di canale A compreso tra le due sezioni di sbocco delle colate interessando la sezione idrica del canale per una estensione lineare di circa 20 cm a partire dalla parete dove sono collocati gli sbocchi stessi. Entrambi i depositi presentano uguale forma anche se il deposito sbocco del canale B appare di minore volumetria se confrontato con quello formatosi a valle della canaletta C (vedi Figura 6.56b e Figura 6.57b), fenomeno che può essere attribuibile al non coinvolgimento di tutto il materiale a disposizione per quanto riguarda la colata generata lungo il canale C (Figura 6.57a). Mentre per quanto concerne il fenomeno di colata innescato lungo la canaletta B si nota che tutto il materiale a disposizione sia stato coinvolto anche se si rileva la presenza di un deposito di entità modeste nella porzione valliva. L'erosione del deposito allo sbocco del canale B ha generato un trasporto solido lungo il canale A che ha interagito con il deposito sedimentatosi a valle della canaletta C, determinando la formazione continua di deposito lungo il tratto di canale che collega i due sbocchi delle canalette laterali (canale B e canale C).

La ricostruzione dei depositi nella canaletta A ottenuta per mezzo di rilievi effettuati con asta graduata viene riportata in Figura 6.58; anche in questo caso si nota l'interazione tra i depositi e il maggiore volume del deposito allo sbocco della canaletta C rispetto a quello formatosi allo sbocco della canaletta B.

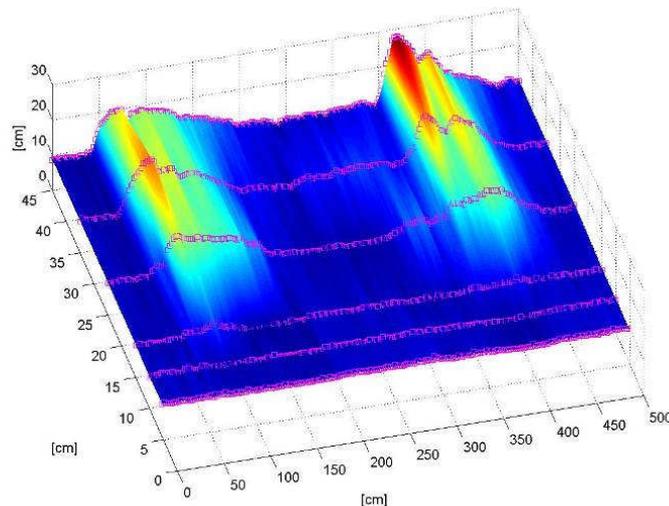


Figura 6.58 Ricostruzione tridimensionale dei depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.10.

In Figura 6.59 e in Figura 6.60 si riportano gli andamenti della variazione della pressione e del livello nel tempo entrambi registrati in funzione della propagazione del fenomeno di colata.

La Figura 6.59a e la Figura 6.59c illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 10 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta A, in prossimità dello sbocco della canaletta B. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 50 cm. L'accoppiamento tra la sonda di livello e la cella di pressione consente di cogliere alcuni interessanti aspetti della dinamica che caratterizza l'evoluzione e il deposito della colata.

L'andamento del grafico in Figura 6.59a indica che, a circa 220 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, tale fenomeno è verosimilmente attribuibile all'erogazione di portata nel canale principale (A). L'inizio del deposito dei sedimenti convogliati dalla colata detritica, generata lungo la canaletta B, si realizza attorno ai 600s. Nell'intervallo di tempo compreso tra i 600 s e i 700 s, si registra un notevole innalzamento dei valori acquisiti sia dalla cella di pressione che dalla sonda di livello (Figura 6.59 a e Figura 6.59c). In particolare, la cella di pressione (Figura 6.59a) evidenzia, l'impatto dinamico della colata detritica sul fondo durante la fase di progressivo accrescimento del deposito individuabile in Figura 6.59a nella fase di picco a circa 650 s.

Infine nell'intervallo compreso tra i 700 s e i 850s, la pressione al fondo e il livello della superficie presentano un andamento oscillatorio verosimilmente attribuibile alla fase di erosione e deposito che caratterizza la propagazione della colata, mentre da 850 s fino alla fine dell'esperimento si osserva un abbassamento nell'andamento delle pressioni (Figura 6.59a) conseguente alla fase di drenaggio dell'ammasso.

La Figura 6.59b e la Figura 6.59d illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 10 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta B, in prossimità dello sbocco. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 20 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.59b indica che, nell'intervallo compreso tra i 200 s e i 600 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un innalzamento di pressione, verosimilmente attribuibile all'erogazione della portata di saturazione. In Figura 6.59d si registra che la propagazione della colata viene registrata nella sezione di misura nell'arco temporale compreso tra 600 s e 680 s, inoltre si evidenzia che il colmo della colata nella sezione viene raggiunto a 620 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati.

La Figura 6.59e illustra l'andamento della sonda di livello posta lungo il canale A a 75 cm circa a valle dello sbocco con la canaletta B. Si registra anche in questo caso che a 220 s circa dall'inizio dell'acquisizione dati un aumento di livello conseguente all'inizio del deflusso idrico lungo il canale A. Successivamente si nota un ulteriore aumento di livello nell'intervallo temporale compreso tra 600 s e la fine dell'acquisizione dati dove si evidenzia la fase di propagazione e deposito del materiale sulla sezione di misura, in particolare a 650 s dall'inizio dell'acquisizione dati si evidenzia in Figura 6.59e l'impatto della colata.

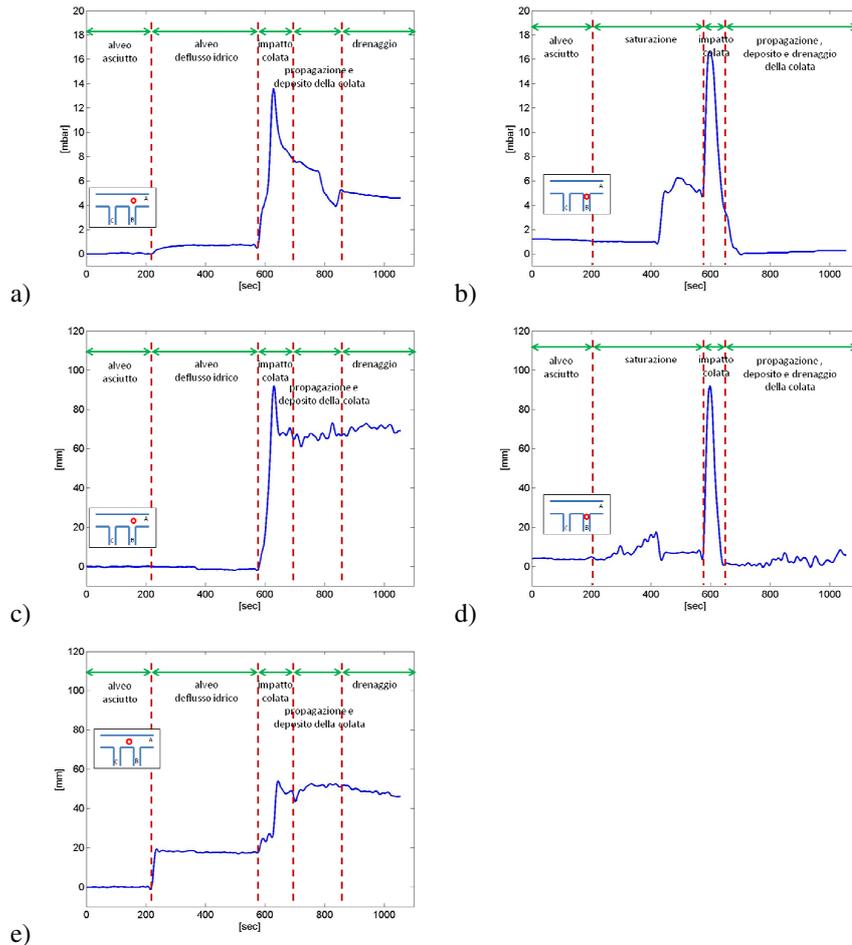


Figura 6.59 Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta B nel canale principale durante la prova 10: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta B; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta B; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.

La Figura 6.60a e la Figura 6.60c illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta A, in prossimità dello sbocco della canaletta C. Analogamente a quanto descritto per la canaletta B, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 50 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.60a indica che, a circa 220 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, fenomeno

conseguente all'inizio del deflusso idrico nel canale A e al contributo della portata di saturazione che filtra attraverso l'ammasso detritico inizialmente collocato nella canaletta C; fenomeno che viene rilevato dalla sonda di livello accoppiata con un leggero andamento ondulatorio (vedi Figura 6.60c). L'inizio del deposito dei sedimenti convogliati dalla colata detritica generata lungo la canaletta C si realizza attorno ai 580 s. L'impatto della colata viene registrato nella sezione di misura a circa 600 s dall'inizio dell'acquisizione dati. Nell'intervallo di tempo tra 700 s e i 880 s si osserva, sia dalla cella di pressione che dalla sonda di livello, un andamento oscillatorio caratteristico della propagazione della colata composto da fasi di erosione e deposito. Infine nell'intervallo compreso tra i 880 s e la fine della prova, la pressione al fondo subisce un abbassamento verosimilmente attribuibile al drenaggio dell'ammasso.

La Figura 6.60b e 6.60d illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 10 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta C, in prossimità dello sbocco. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 20 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.60b indica che, a circa 500 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, verosimilmente attribuibile all'erogazione della portata di saturazione. Il passaggio del colmo caratteristico della propagazione della colata viene registrato, sia dalla cella di pressione che dal sensore di livello (Figura 6.60b e Figura 6.60d) nella sezione di misura a 600 s. Infine nell'intervallo compreso tra i 700 s e la fine della prova, si nota un andamento costante dei livelli e quindi una condizione stazionaria del deposito, mentre la pressione al fondo subisce un abbassamento verosimilmente attribuibile all'arresto della portata erogata lungo il canale C.

La Figura 6.60e illustra l'andamento della sonda di livello posta lungo il canale A a 75 cm circa a valle dello sbocco con la canaletta C. Si registra anche in questo caso, a 220 s circa dall'inizio dell'acquisizione dati, un aumento di livello conseguente all'inizio del deflusso idrico lungo il canale A, e successivamente un aumento di livello, anche se di entità modesta, nell'intervallo temporale compreso tra 580 s e 880 s al trasporto solido conseguente all'erosione del materiale depositato più a monte. Anche in questo caso per tempi superiore ai 880 s si registra un abbassamento di livello dovuto all'arresto del deflusso idrico lungo il canale A.

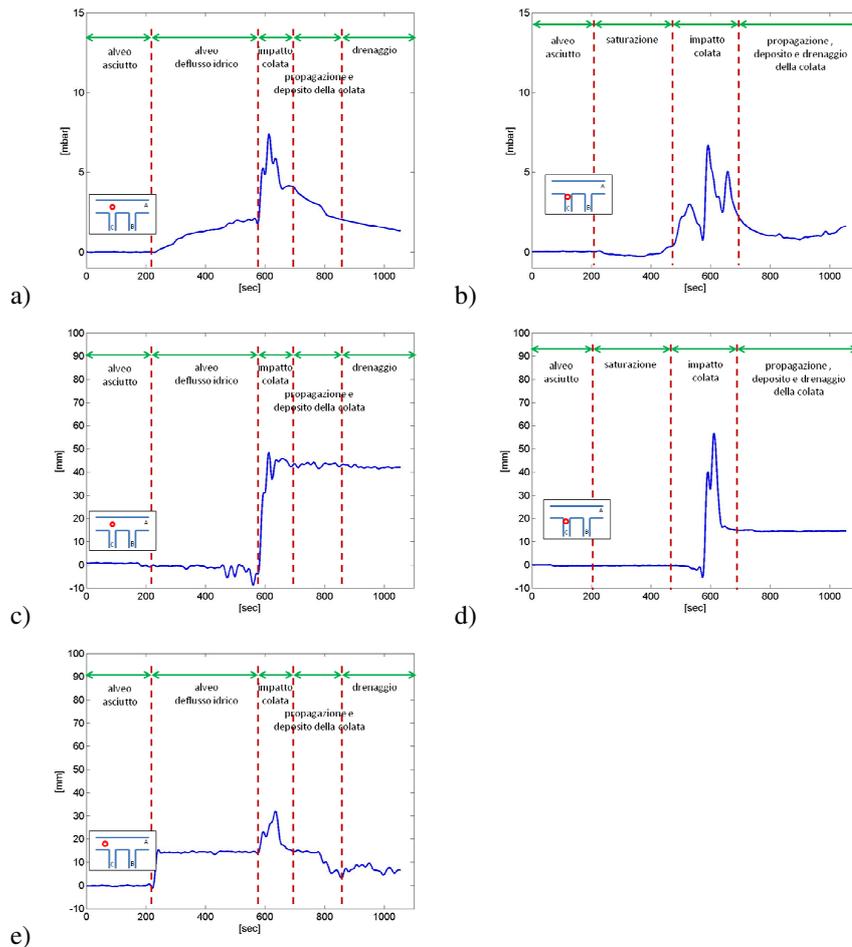


Figura 6.60 Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta C nel canale principale durante la prova 10: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta C; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta C; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.

6.12 Esperimento 11 ($\alpha=60^\circ$, $\beta=15^\circ$, B->C)

L'esperimento no.11 è caratterizzato dai parametri macroscopici e dai parametri idraulici di controllo riportati in Tabella 6.XII. L'inclinazione della canaletta A è stata fissata a 5° e quelle delle canalette B e C a 15° . Lo strato di materiale posto lungo le

canalette laterali è di 10 cm circa e la portata di saturazione degli ammassi è pari a 0.78 l/s, valore strettamente dipendente dalla tipologia di materiale utilizzato e dallo spessore dell'ammasso.

Tabella 6.XII Parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e parametri idraulici adottati nell'esperimento 11: numero d'ordine della prova, portata fluente nella canaletta principale, angolo di confluenza delle canalette laterali e istanti di innesco delle colate e portata di innesco nelle canalette laterali.

N. exp.	canaletta A	canaletta B			canaletta C		
	Portata [l/s]	Angolo di confluenza	t_0 innesco [s]	Portata di innesco [l/s]	Angolo di confluenza	t_0 innesco [s]	Portata di innesco [l/s]
11	5.08	60°	0	2.83	60°	214	2.63

Durante l'esperimento si sono innescati due differenti colate detritiche. Inizialmente si è innescata la colata lungo la canaletta di monte (canaletta B) e successivamente, dopo circa 3 minuti e mezzo, si è innescata la colata nella canaletta a valle (Canale C).

In Figura 6.61, in Figura 6.62 e in Figura 6.63 vengono presentate alcune immagini acquisite alla fine dell'esperimento, in condizioni drenate. In particolare, dalle Figura 6.61 evincono le forme di deposito allo stadio finale per l'intera estensione del canale A. In Figura 6.62a e in Figura 6.62b vengono rappresentate la quantità di materiale eroso durante l'esperimento lungo la canaletta laterale e la forma del deposito allo sbocco per la canaletta B; e in maniera analoga in Figura 6.63a e in Figura 6.63b per la canaletta C.



Figura 6.61 Vista generale dei depositi lungo la canaletta A in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.11 ad esperimento concluso.

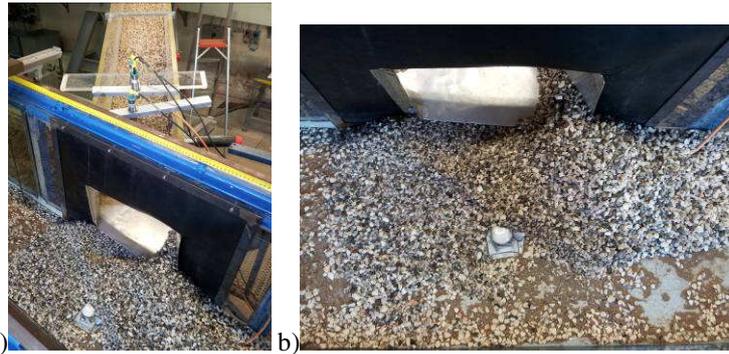


Figura 6.62 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.11 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta B; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta B.

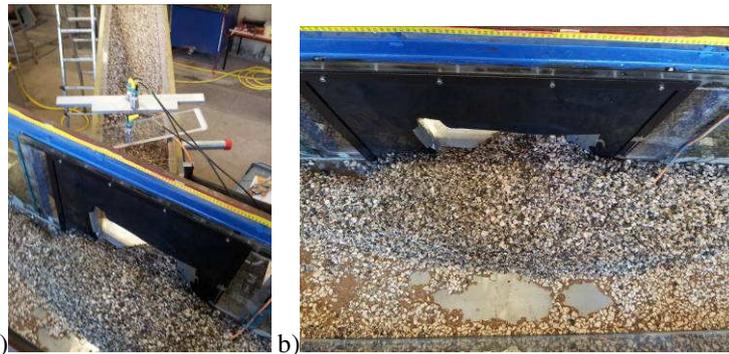


Figura 6.63 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.11 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta C; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta C.

Da queste immagini si osservano i fenomeni di deposito a valle delle canalette B e C: si osserva, in particolare, la debole interazione tra i fenomeni di deposito, condizione resa evidente in Figura 6.61 dove si nota chiaramente come l'erosione del deposito a valle della canaletta B abbia interagito in piccola parte con il deposito della canaletta C. Anche se la portata defluente lungo il canale A ha comunque effettuato una importante azione erosiva del materiale pervenuto dalla colata generata lungo le canalette B, tanto da creare un deposito considerevole a monte dello sbocco della canaletta C (vedi Figura 6.61), il quale tra l'altro appare fortemente modellato dalla corrente idrica. Inoltre appare opportuno far notare come il fenomeno di colata innescato nel canale C non abbia coinvolto tutto il materiale a disposizione. Infatti si vede come sia rimasto parte del materiale nella zona valliva della canaletta (Figura 6.63a), mentre per la canaletta B il materiale a disposizione è stato coinvolto nella sua globalità dal fenomeno di colata (Figura 6.62a).

La ricostruzione dei depositi nella canaletta A ottenuta per mezzo di rilievi effettuati con asta graduata viene riportata in Figura 6.64. Anche in questo caso la scarsa

interazione tra i depositi che la maggiore estensione e il maggiore volume del deposito allo sbocco della canaletta C rispetto a quello formatosi allo sbocco della canaletta B.

Dal confronto delle immagini (Figura 6.61) e del rilievo effettuato (Figura 6.64) è subito evidente come il deposito a valle della canaletta C sia maggiormente esteso sia a monte che a valle rispetto a quello della canaletta B.

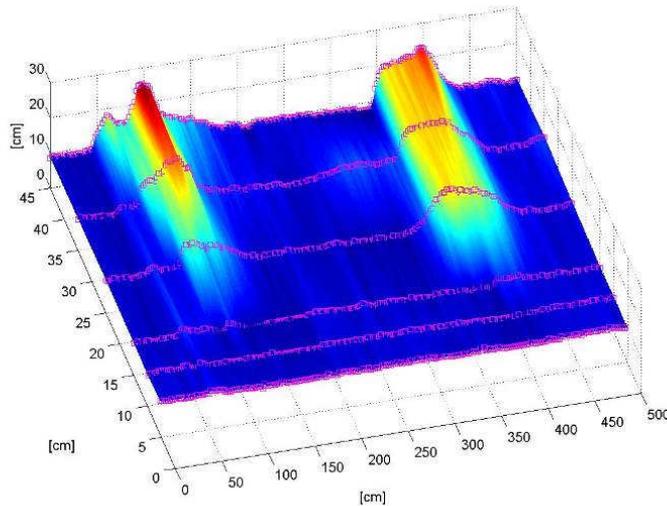


Figura 6.64 Ricostruzione tridimensionale dei depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.11.

In Figura 6.65 e in Figura 6.66 si riportano gli andamenti della variazione della pressione e del livello nel tempo entrambi registrati in funzione della propagazione del fenomeno di colata.

La Figura 6.65a e la Figura 6.65c illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 11 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta A, in prossimità dello sbocco della canaletta B. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 50 cm.. L'andamento del grafico in Figura 6.65a indica che, a circa 450 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, della durata di circa 300 s. Tale fenomeno è verosimilmente attribuibile all'aumento di portata nel canale principale (A) dovuto al contributo della portata di saturazione che filtra attraverso l'ammasso detritico inizialmente collocato nella canaletta C. Tale fenomeno invece viene avvertito dalla sonda di livello accoppiata con un leggero andamento ondulatorio (vedi Figura 6.65c). L'inizio del deposito dei sedimenti convogliati dalla colata detritica, generata lungo la canaletta B, si realizza attorno ai 750 s. Nell'intervallo di tempo tra 750 s e 1100 s si osserva un notevole innalzamento dei valori acquisiti sia dalla cella di pressione che dalla sonda di livello. In particolare, la cella di pressione evidenzia, l'impatto dinamico della colata detritica sul fondo durante la fase di progressivo accrescimento del deposito individuato da un picco di pressione registrato a 850 s.

Nell'intervallo di tempo tra 900 s e 1100 s si osserva un comportamento abbastanza stazionario del deposito, verosimilmente legato all'alternarsi di fasi di accrescimento e erosione del deposito in equilibrio dinamico tra loro. Infine nell'intervallo compreso tra i 1100 s e la fine della prova, la pressione al fondo subisce un abbassamento verosimilmente attribuibile al drenaggio dell'ammasso.

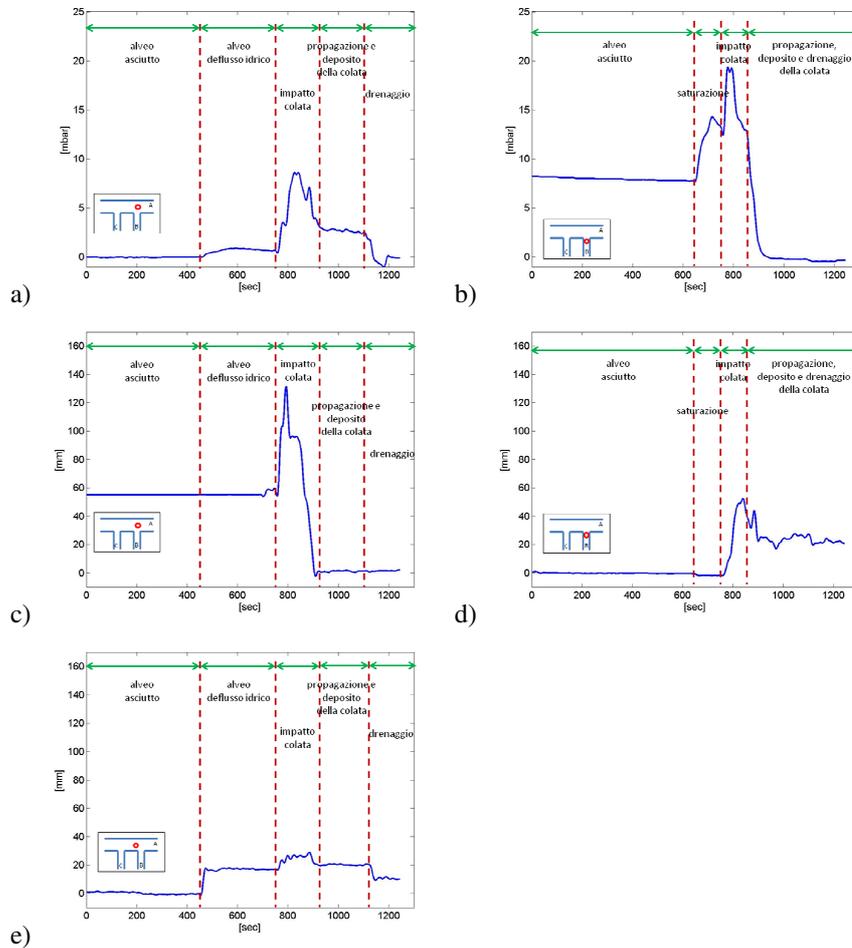


Figura 6.65 Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta B nel canale principale durante la prova 11: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta B; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta B; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.

La Figura 6.65b e la Figura 6.65d illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 11 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta B, in prossimità dello sbocco. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 20 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.65b indica che, a circa 630 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, verosimilmente attribuibile all'erogazione della portata di saturazione che genera successivamente l'innescò della colata. Mentre in Figura 6.65d si registra che la propagazione della colata viene registrata nella sezione di misura nell'arco temporale compreso tra 750 s e 1250 s, il passaggio del colmo della propagazione della colata viene rilevato nella sezione di misura a 800 s dall'inizio dell'acquisizione dati.

La Figura 6.65e illustra l'andamento della sonda di livello posta lungo il canale A a 75 cm circa a valle dello sbocco con la canaletta B. Si registra anche in questo caso che a 450 s circa dall'inizio dell'acquisizione dati un aumento di livello conseguente all'inizio del deflusso idrico lungo il canale A, e successivamente un aumento di livello, anche se di entità modesta, nell'intervallo temporale compreso tra 750 s e 1100 s al trasporto solido conseguente all'erosione del materiale depositato più a monte. Infine nell'intervallo di tempo tra i 1100 e la fine di acquisizione dati si osserva un abbassamento di livello percepito dalla sonda acustica di livello verosimilmente attribuibile alla fine dell'erogazione della portata idrica defluente lungo il canale A.

La Figura 6.66a e la Figura 6.66c illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta A, in prossimità dello sbocco della canaletta C. Analogamente a quanto descritto per la canaletta B, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 50 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.66a indica che, a circa 450 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, fenomeno conseguente all'inizio del deflusso idrico nel canale A. L'inizio del deposito dei sedimenti convogliati dalla colata detritica, generata lungo la canaletta C, si realizza attorno ai 850s. Nell'intervallo di tempo tra 850 s e 1100 s si osserva un notevole innalzamento dei valori acquisiti sia dalla cella di pressione che dalla sonda di livello, fenomeno conseguente al passaggio dell'onda di piena, l'impatto della colata si registra a circa 950 s dall'inizio di acquisizione dei dati. Infine nell'intervallo compreso tra i 1100 s e la fine della prova, la pressione al fondo e il livello della superficie subiscono un abbassamento verosimilmente attribuibili al drenaggio dell'ammasso.

La Figura 6.66b e la Figura 6.66d illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 11 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta C, in prossimità dello sbocco. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 20 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.66b e quello in Figura 6.66d indicano che, a circa 450 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, verosimilmente attribuibile alla fase di saturazione dell'ammasso. La propagazione della colata viene registrata nella sezione di misura nell'arco temporale compreso tra 850 s e 1100 s,

mentre il passaggio del colmo dell'onda di propagazione della colata avviene a circa 900 s.

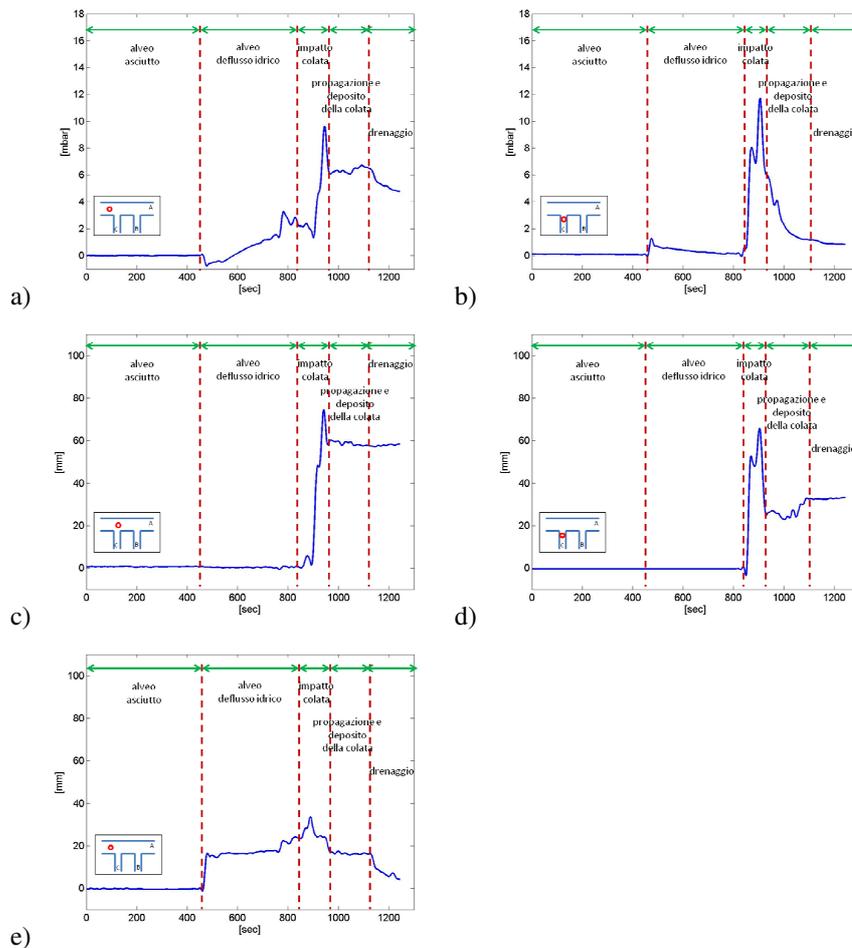


Figura 6.66 Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta C nel canale principale durante la prova 11: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta C; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta C; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.

La Figura 6.66e illustra l'andamento della sonda di livello posta lungo il canale A a 75 cm circa a valle dello sbocco con la canaletta C. Si registra anche in questo caso, a 450 s circa dall'inizio dell'acquisizione dati, un aumento di livello conseguente all'inizio del deflusso idrico lungo il canale A, e successivamente un aumento di livello, anche se di entità modesta, nell'intervallo temporale compreso tra 800 s e 1100 s

conseguente al trasporto solido e all'erosione del materiale depositato più a monte. Infine nell'intervallo di tempo compreso tra i 1100 s e la fine dell'acquisizione dati si osserva un abbassamento di livello registrato dalla sonda verosimilmente attribuibile all'interruzione dell'erogazione di portata lungo il canale A.

6.13 Esperimento 12 ($\alpha=60^\circ$, $\beta=15^\circ$, C->B)

L'esperimento no.12 è caratterizzato dai parametri macroscopici e dai parametri idraulici di controllo riportati in Tabella 6.XIII. L'inclinazione della canaletta A è stata fissata a 5° e quelle delle canalette B e C a 15° . Lo strato di materiale posto lungo le canalette laterali è di 10 cm circa e la portata di saturazione degli ammassi è pari a 0.78 l/s, valore strettamente dipendente dalla tipologia di materiale utilizzato e dallo spessore dell'ammasso.

Tabella 6.XIII Parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e parametri idraulici adottati nell'esperimento 12: numero d'ordine della prova, portata fluente nella canaletta principale, angolo di confluenza delle canalette laterali e istanti di innesco delle colate e portata di innesco nelle canalette laterali.

N. exp.	canaletta A	canaletta B			canaletta C		
	Portata [l/s]	Angolo di confluenza	t_0 innesco [s]	Portata di innesco [l/s]	Angolo di confluenza	t_0 innesco [s]	Portata di innesco [l/s]
12	5.02	60°	219	2.84	60°	0	2.70

Durante l'esperimento sono stati innescati due differenti fenomeni di colate detritiche, il primo ha interessato la canaletta di valle (canale C) e dopo circa 3 minuti e mezzo è stato innescato invece il fenomeno di colata detritica lungo la canaletta a monte (canale B).

In Figura 6.67, in Figura 6.68 e in Figura 6.69 vengono presentate alcune immagini acquisite alla fine dell'esperimento, in condizioni drenate. In particolare, dalla Figura 6.67 si evincono le forme di deposito realizzatesi lungo il canale A alla fine dell'esperimento. In Figura 6.68a e in Figura 6.68b vengono rappresentate la quantità di materiale eroso durante l'esperimento lungo la canaletta laterale e la forma del deposito allo sbocco per la canaletta B; e in maniera analoga in Figura 6.69a e in Figura 6.69b per la canaletta C.

Da queste immagini si osservano i fenomeni di deposito a valle delle canalette B e C: si nota in particolare, come si sia realizzata lungo il canale A un'interazione tra i depositi. In particolare, l'interazione si è realizzata lungo il tratto di canale A interessando la porzione compresa tra i due sbocchi delle canalette laterali, quindi si è costituita una striscia continua di deposito avente larghezza di circa 15 cm. Il deposito a valle della canaletta C è stato quello maggiormente eroso dalla portata che defluiva lungo il canale A, esso appare meno esteso se confrontato con quello formatosi a valle della canaletta B (vedi Figura 6.67). L'erosione del deposito allo sbocco del canale B ha

generato un trasporto solido lungo il canale A che ha interagito con il deposito sedimentatosi a valle della canaletta C, determinando un deposito di forma allungata a monte del deposito allo sbocco della canaletta C. Inoltre appare opportuno far notare come entrambi i fenomeni di colata innescati non abbiano coinvolto tutto il materiale a disposizione (Figura 6.68a e Figura 6.69b), infatti una quantità minima di materiale è rimasta depositata lungo il canale B mentre per quanto concerne il canale C il materiale che si è propagato con la colata rappresenta solo una quota parte del materiale a disposizione lungo il letto del canale.



Figura 6.67 Vista generale dei depositi lungo la canaletta A in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.12 ad esperimento concluso.

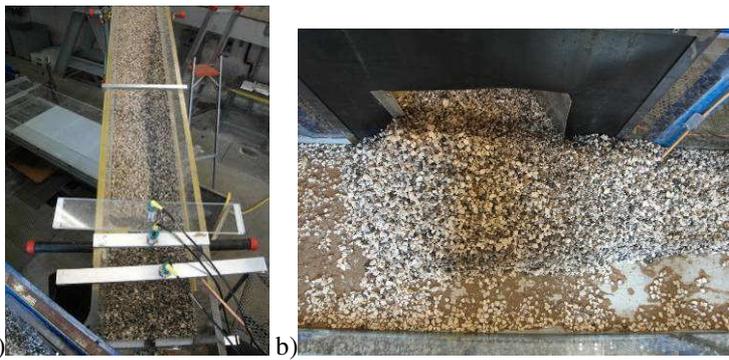


Figura 6.68 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.12 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta B; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta B.

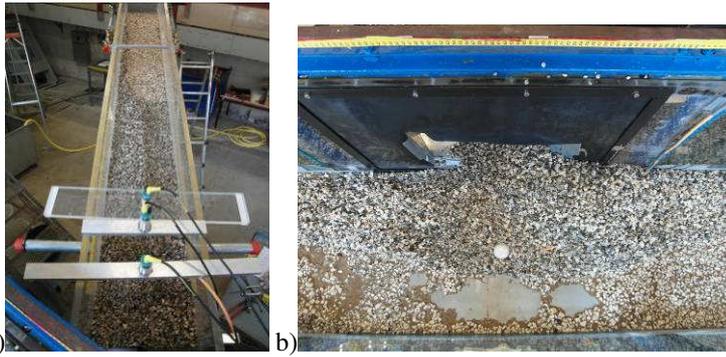


Figura 6.69 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.12 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta C; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta C.

La ricostruzione dei depositi nella canaletta A ottenuta per mezzo di rilievi effettuati con asta graduata viene riportata in Figura 6.70; anche in questo caso si nota l'interazione tra i depositi e la maggiore estensione e volume del deposito allo sbocco della canaletta B rispetto a quello formatosi allo sbocco della canaletta C.

Dal confronto delle immagini (Figura 6.67) e del rilievo effettuato (Figura 6.70) è subito evidente come il deposito a valle della canaletta C è di minor volume rispetto a quello della canaletta B.

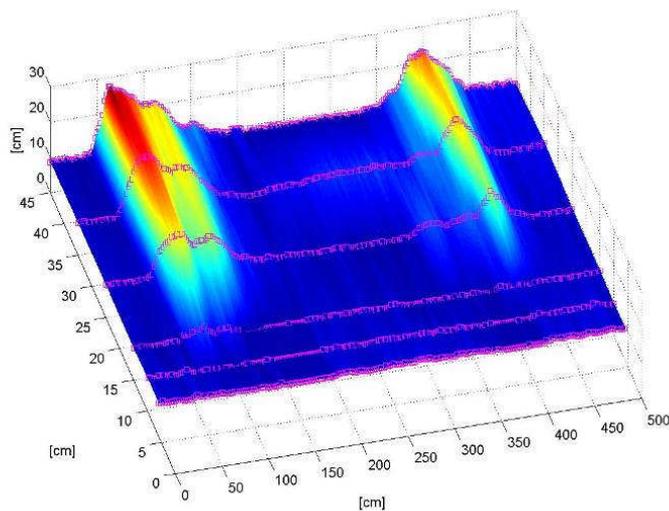


Figura 6.70 Ricostruzione tridimensionale dei depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.12.

In Figura 6.71 e in Figura 6.72 si riportano gli andamenti della variazione della pressione e del livello nel tempo entrambi registrati in funzione della propagazione del fenomeno di colata.

La Figura 6.71a e la Figura 6.71c illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 12 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta A, in prossimità dello sbocco della canaletta B. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 50 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.71a indica che, a circa 550 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, tale fenomeno è verosimilmente attribuibile all'erogazione di portata nel canale principale (A). L'inizio del deposito dei sedimenti convogliati dalla colata detritica, generata lungo la canaletta B, si realizza attorno ai 1080 s. Nell'intervallo di tempo compreso tra i 1080 s e i 1200 s, si registra un notevole innalzamento dei valori acquisiti sia dalla cella di pressione che dalla sonda di livello (Figura 3 a e c). In particolare, la cella di pressione (Figura 6.71 a) evidenzia, l'impatto dinamico della colata detritica sul fondo durante la fase di progressivo accrescimento del deposito individuato da un picco di pressione registrato a 1100 s dall'inizio di acquisizione dei dati. Infine nell'intervallo compreso tra i 1100 s e i 1200 s, si osserva un comportamento intermittente del deposito, verosimilmente legato all'alternarsi di fasi di accrescimento e parziale erosione; mentre da 1200 s fino alla fine dell'esperimento si osserva attraverso l'abbassamento d'andamento registrato sia dalla cella di pressione che dal sensore di livello la fase di drenaggio dell'ammasso.

La Figura 6.71b e la Figura 6.71d illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 12 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta B, in prossimità dello sbocco. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 20 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.71b indica che, a circa 980 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un innalzamento di pressione, verosimilmente attribuibile all'erogazione della portata di saturazione. In Figura 3d si registra che la propagazione della colata viene registrata nella sezione di misura nell'arco temporale compreso tra 1020 s e 1150 s, inoltre si evidenzia che il colmo della colata nella sezione viene raggiunto a 1000 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati.

La Figura 6.71e illustra l'andamento della sonda di livello posta lungo il canale A a 75 cm circa a valle dello sbocco con la canaletta B. Si registra anche in questo caso che a 550 s circa dall'inizio dell'acquisizione dati un aumento di livello conseguente all'inizio del deflusso idrico lungo il canale A, e successivamente un aumento di livello, anche se di entità modesta, nell'intervallo temporale compreso tra 1080 s e 1200 s al trasporto solido conseguente all'erosione del materiale depositato più a monte. Anche in questo caso per tempi superiori ai 1200 s si registra un abbassamento di livello dovuto all'arresto del deflusso idrico lungo il canale A.

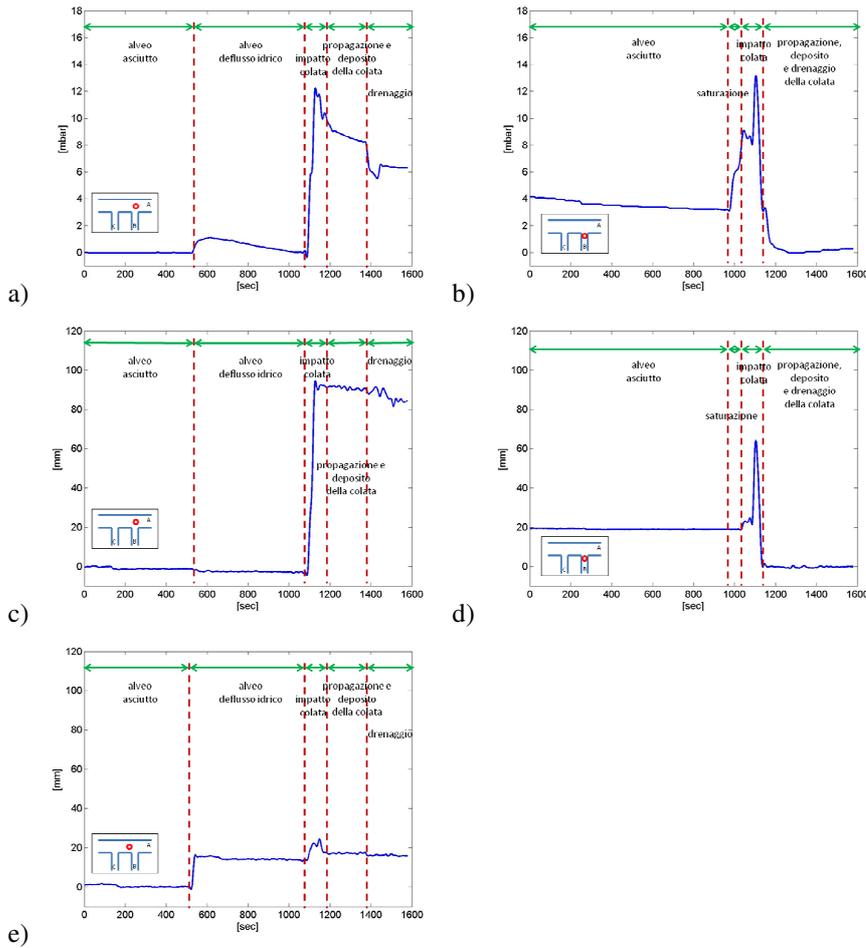


Figura 6.71 Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta B nel canale principale durante la prova 12: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta B; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta B; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.

La Figura 6.72a e la Figura 6.72c illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta A, in prossimità dello sbocco della canaletta C. Analogamente a quanto descritto per la canaletta B, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 50 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.72a indica che, a circa 550 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, fenomeno

conseguente all'inizio del deflusso idrico nel canale A e al contributo della portata di saturazione che filtra attraverso l'ammasso detritico inizialmente collocato nella canaletta C; fenomeno che viene rilevato dalla sonda di livello accoppiata con un leggero andamento ondulatorio (vedi Figura 6.72c). L'inizio del deposito dei sedimenti convogliati dalla colata detritica generata lungo la canaletta C si realizza attorno ai 850 s. Nell'intervallo di tempo tra 850 s e i 1400s si osserva un notevole innalzamento dei valori acquisiti sia dalla cella di pressione che dalla sonda di livello, fenomeno conseguente al passaggio dell'onda di piena e al depositarsi del materiale al fondo. In particolare la cella di pressione identifica la fase di deposizione del materiale come composta da due fasi, identificabili dall'andamento del grafico in Figura 6.72 attraverso i due picchi realizzatisi a 900 s e 1100 s. Infine nell'intervallo compreso tra i 1400 s e la fine della prova, la pressione al fondo e il livello della superficie subiscono un abbassamento verosimilmente attribuibile al drenaggio dell'ammasso.

La Figura 6.72b e la Figura 6.72d illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 12 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta C, in prossimità dello sbocco. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 20 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.72b indica che, a circa 550 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, verosimilmente attribuibile all'erogazione della portata di saturazione. Mentre in Figura 6.72d si registra che la propagazione della colata viene registrata nella sezione di misura nell'arco temporale compreso tra 800 s e 1400 s. Il passaggio del colmo della colata viene rilevato sia dalla cella di pressione che dal sensore di livello a 900 s dall'inizio di acquisizione dati. Infine nell'intervallo compreso tra i 1400 s e la fine della prova, la pressione al fondo subisce un abbassamento nell'andamento registrato verosimilmente attribuibile all'arresto della portata erogata lungo il canale C.

La Figura 6.72e illustra l'andamento della sonda di livello posta lungo il canale A a 75 cm circa a valle dello sbocco con la canaletta C. Si registra anche in questo caso, a 550 s circa dall'inizio dell'acquisizione dati, un aumento di livello conseguente all'inizio del deflusso idrico lungo il canale A, e successivamente un aumento di livello, anche se di entità modesta, nell'intervallo temporale compreso tra 850 s e 1400 s al trasporto solido conseguente all'erosione del materiale depositato più a monte. Anche in questo caso per tempi superiori ai 1400 s si registra un abbassamento di livello dovuto all'arresto del deflusso idrico lungo il canale A.

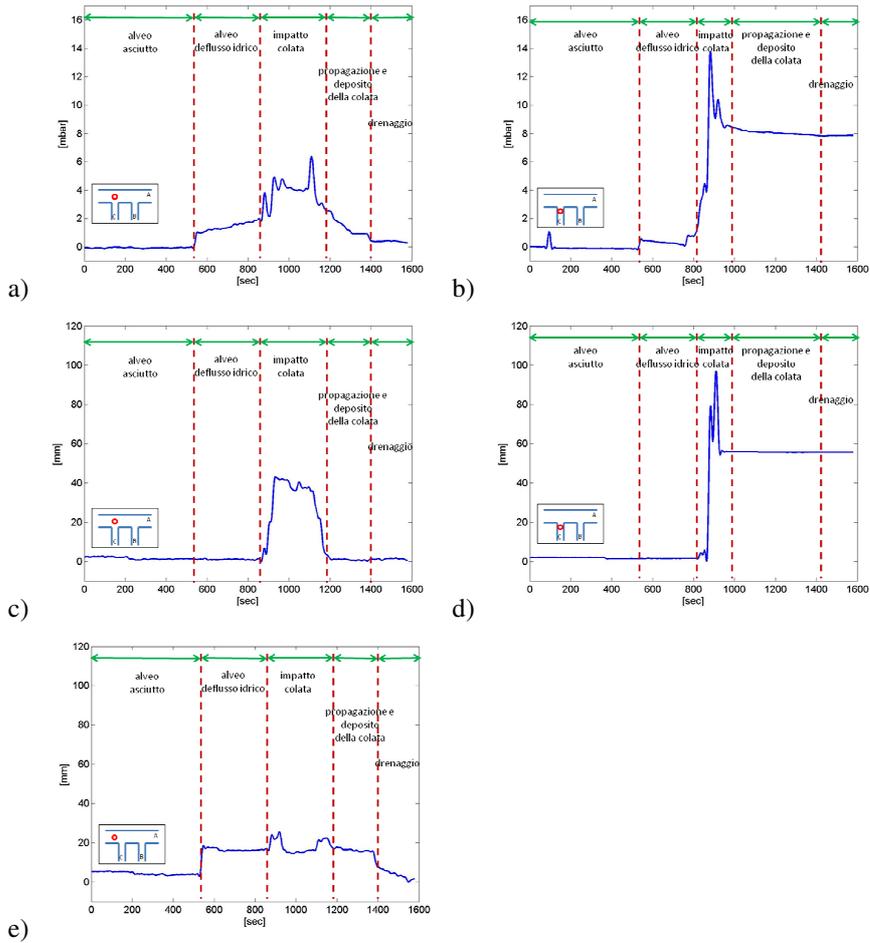


Figura 6.72 Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta C nel canale principale durante la prova 12: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta C; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta C; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.

6.14 Esperimento 13 ($\alpha=50^\circ$, $\beta=15^\circ$, B=C)

L'esperimento no.13 è caratterizzato dai parametri macroscopici e dai parametri idraulici di controllo riportati in Tabella 6.XIV. L'inclinazione della canaletta A è stata fissata a 5° e quelle delle canalette B e C a 15° . Lo strato di materiale posto lungo le

canalette laterali è di 10 cm circa e la portata di saturazione degli ammassi è pari a 0.78 l/s, valore strettamente dipendente dalla tipologia di materiale utilizzato e dallo spessore dell'ammasso.

Tabella 6.XIV Parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e parametri idraulici adottati nell'esperimento 13: numero d'ordine della prova, portata fluente nella canaletta principale, angolo di confluenza delle canalette laterali e istanti di innesco delle colate e portata di innesco nelle canalette laterali.

N. exp.	canaletta A	canaletta B			canaletta C		
	Portata [l/s]	Angolo di confluenza	t_0 innesco [s]	Portata di innesco [l/s]	Angolo di confluenza	t_0 innesco [s]	Portata di innesco [l/s]
13	5.00	50°	0	2.13	50°	0	3.00

Durante l'esperimento sono stati innescati due differenti fenomeni di colate detritiche, che si sono propagati contemporaneamente lungo le due canalette laterali (canale B e canale C).

In Figura 6.73, in Figura 6.74 e in Figura 6.75 vengono presentate alcune immagini acquisite alla fine dell'esperimento, in condizioni drenate. In particolare, dalla Figura 6.73 si evincono le forme di deposito realizzatesi lungo il canale A alla fine dell'esperimento. In Figura 6.74a e in Figura 6.74b vengono rappresentate la quantità di materiale eroso durante l'esperimento lungo la canaletta laterale e la forma del deposito allo sbocco per la canaletta B; e in maniera analoga in Figura 6.75a e in Figura 6.75b per la canaletta C.



Figura 6.73 Vista generale dei depositi lungo la canaletta A in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n. 13 ad esperimento concluso.

Da queste immagini si osservano i fenomeni di deposito a valle delle canalette B e C: si nota in particolare, come si sia realizzata lungo il canale A un'interazione tra i depositi. In particolare, l'interazione si è realizzata lungo tutto il tratto di canale A compreso tra le due sezioni di sbocco delle colate interessando la sezione idrica del canale per una estensione lineare di circa 10 cm a partire dalla parete dove sono collocati gli sbocchi stessi, mentre nella parete opposta del canale si è venuto a creare

un piccolo deposito con larghezza di 2 cm circa a partire dalla parete. Entrambi i depositi presentano uguale forma anche se il deposito sbocco del canale C appare di minore volumetria se confrontato con quello formatosi a valle della canaletta B (vedi Figura 6.74b e Figura 6.75b), fenomeno che può essere attribuibile al non coinvolgimento di tutto il materiale a disposizione per quanto riguarda la colata generata lungo il canale C (Figura 6.75a). Mentre per quanto concerne il fenomeno di colata innescato lungo la canaletta B si nota che tutto il materiale a disposizione sia stato coinvolto anche se si rileva la presenza di un deposito di entità modeste nella porzione valliva. L'erosione del deposito allo sbocco del canale B ha generato un trasporto solido lungo il canale A che ha interagito con il deposito sedimentatosi a valle della canaletta C, determinando la formazione continua di deposito lungo il tratto di canale che collega i due sbocchi delle canalette laterali (canale B e canale C).

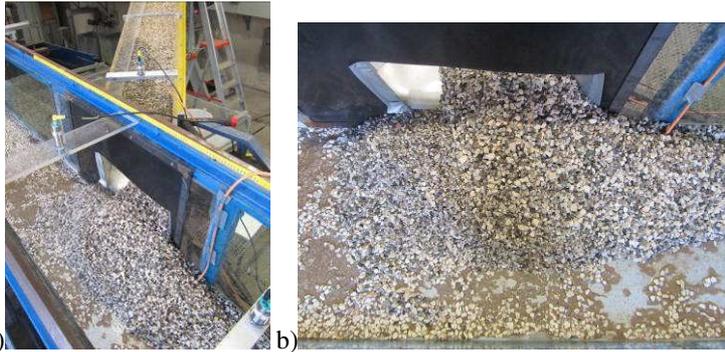


Figura 6.74 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.13 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta B; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta B.

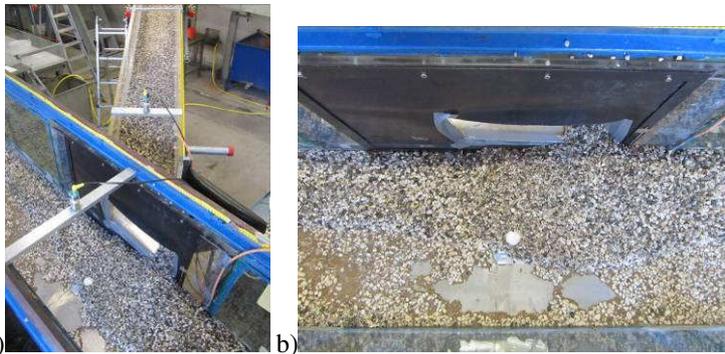


Figura 6.75 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.13 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta C; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta C.

La ricostruzione dei depositi nella canaletta A ottenuta per mezzo di rilievi effettuati con asta graduata viene riportata in Figura 4; anche in questo caso si nota

l'interazione tra i depositi e il maggiore volume del deposito allo sbocco della canaletta B rispetto a quello formatosi allo sbocco della canaletta C.

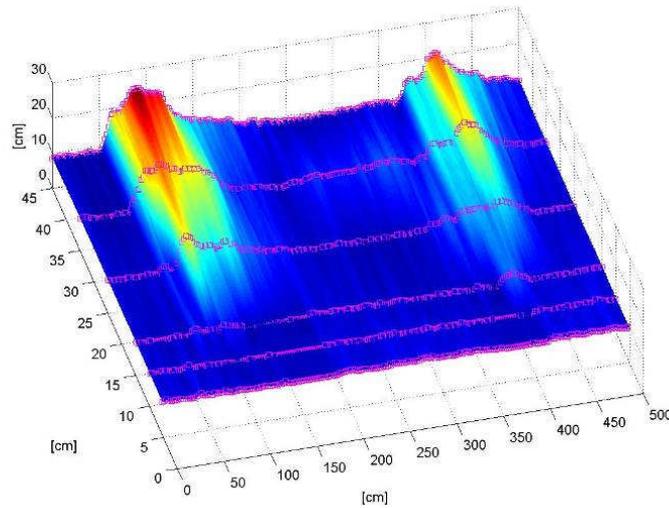


Figura 6.76 Ricostruzione tridimensionale dei depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.13.

6.15 Esperimento 14 ($\alpha=90^\circ$, $\beta=15^\circ$, B=C)

L'esperimento no.14 è caratterizzato dai parametri macroscopici e dai parametri idraulici di controllo riportati in Tabella 6.XV. L'inclinazione della canaletta A è stata fissata a 5° e quelle delle canalette B e C a 15° . Lo strato di materiale posto lungo le canalette laterali è di 10 cm circa e la portata di saturazione degli ammassi è pari a 0.78 l/s, valore strettamente dipendente dalla tipologia di materiale utilizzato e dallo spessore dell'ammasso.

Tabella 6.XV Parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e parametri idraulici adottati nell'esperimento 14: numero d'ordine della prova, portata fluente nella canaletta principale, angolo di confluenza delle canalette laterali e istanti di innesco delle colate e portata di innesco nelle canalette laterali.

N. exp.	canaletta A	canaletta B			canaletta C		
	Portata [l/s]	Angolo di confluenza	t_0 innesco [s]	Portata di innesco [l/s]	Angolo di confluenza	t_0 innesco [s]	Portata di innesco [l/s]
14	5.08	90°	0	2.88	90°	0	2.10

Durante l'esperimento sono stati innescati due differenti fenomeni di colate detritiche, che sono stati innescati contemporaneamente lungo le due canalette laterali (canale B e canale C).

In Figura 6.77, in Figura 6.78 e in Figura 6.79 vengono presentate alcune immagini acquisite alla fine dell'esperimento, in condizioni drenate. In particolare, dalla Figura 6.77 si evincono le forme di deposito realizzatesi lungo il canale A alla fine dell'esperimento. In Figura 6.78a e in Figura 6.78b vengono rappresentate la quantità di materiale eroso durante l'esperimento lungo la canaletta laterale e la forma del deposito allo sbocco per la canaletta B; e in maniera analoga in Figura 6.79a e in Figura 6.79b per la canaletta C.

Da queste immagini si osservano i fenomeni di deposito a valle delle canalette B e C: si nota in particolare, come si sia realizzata lungo il canale A un'interazione tra i depositi. In particolare, l'interazione si è realizzata lungo tutto il tratto di canale A compreso tra le due sezioni di sbocco delle colate interessando la sezione idrica del canale per una estensione lineare di circa 10 cm a partire dalla parete dove sono collocati gli sbocchi stessi, mentre nella parete opposta del canale si è venuto a creare un piccolo deposito con larghezza di 2 cm circa a partire dalla parete. Entrambi i depositi presentano uguale forma anche se il deposito sbocco del canale C appare di minore volumetria se confrontato con quello formatosi a valle della canaletta B (vedi Figura 6.78b e Figura 6.79b), fenomeno che può essere attribuibile al non coinvolgimento di tutto il materiale a disposizione per quanto riguarda la colata generata lungo il canale C (Figura 6.79a). Mentre per quanto concerne il fenomeno di colata innescato lungo la canaletta B si nota che tutto il materiale a disposizione sia stato coinvolto anche se si rileva la presenza di un deposito di entità modeste nella porzione valliva. L'erosione del deposito allo sbocco del canale B ha generato un trasporto solido lungo il canale A che ha interagito con il deposito sedimentatosi a valle della canaletta C, determinando la formazione continua di deposito lungo il tratto di canale che collega i due sbocchi delle canalette laterali (canale B e canale C).



Figura 6.77 Vista generale dei depositi lungo la canaletta A in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.14 ad esperimento concluso.

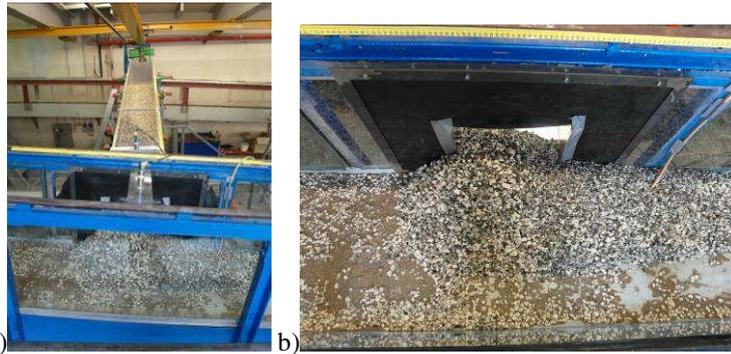


Figura 6.78 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.14 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta B; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta B.



Figura 6.79 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.14 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta C; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta C.

La ricostruzione dei depositi nella canaletta A ottenuta per mezzo di rilievi effettuati con asta graduata viene riportata in Figura 6.80; anche in questo caso si nota l'interazione tra i depositi e il maggiore volume del deposito allo sbocco della canaletta B rispetto a quello formatosi allo sbocco della canaletta C.

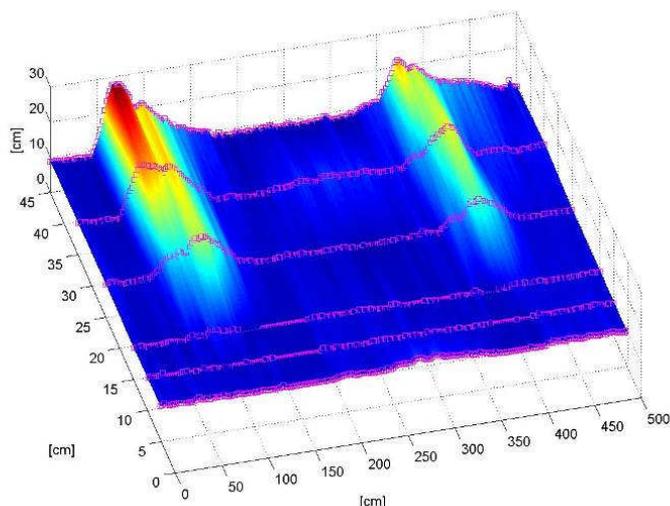


Figura 6.80 Ricostruzione tridimensionale dei depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.14.

In Figure 6.81 e Figura 6.82 si riportano gli andamenti della variazione della pressione e del livello nel tempo entrambi registrati in funzione della propagazione del fenomeno di colata.

La Figura 6.81a e la Figura 6.81c illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 14 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta A, in prossimità dello sbocco della canaletta B. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 50 cm.

L'andamento del grafico in Figura 6.81a indica che, a circa 60 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, tale fenomeno è verosimilmente attribuibile all'erogazione di portata nel canale principale (A). L'inizio del deposito dei sedimenti convogliati dalla colata detritica, generata lungo la canaletta B, si realizza attorno ai 420 s. Nell'intervallo di tempo compreso tra i 420 s e i 720 s, si registra un notevole innalzamento dei valori acquisiti sia dalla cella di pressione che dalla sonda di livello (Figura 6.81a e Figura 6.81c). In particolare, la cella di pressione (Figura 6.81a) evidenzia, l'impatto dinamico della colata detritica sul fondo durante la fase di progressivo accrescimento del deposito individuabile in Figura 6.81a nella fase di picco a circa 480 s.

Infine nell'intervallo compreso tra i 580 s e i 700s, la pressione al fondo e il livello della superficie presentano un andamento pressoché stazionario verosimilmente attribuibile all'equilibrio dinamico del fenomeno di deposizione, mentre da 700 s fino alla fine dell'esperimento si osserva un abbassamento nell'andamento delle pressioni (Figura 6.81a) conseguente alla fase di drenaggio dell'ammasso.

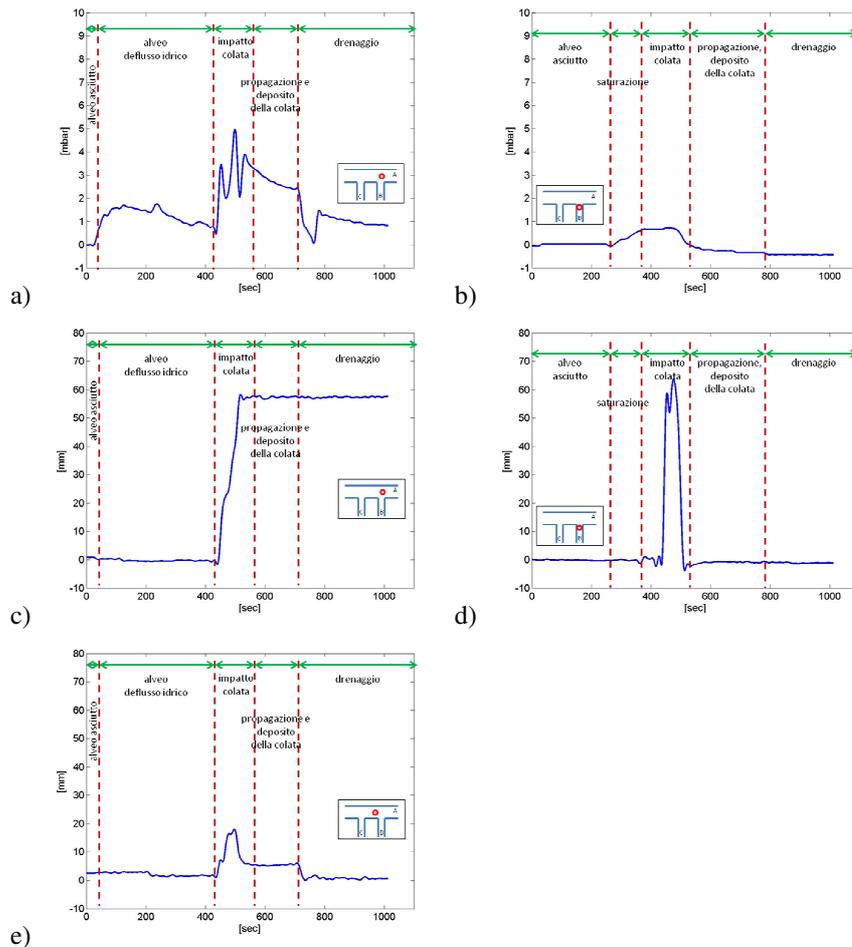


Figura 6.81 Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta B nel canale principale durante la prova 14: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta B; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta B; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.

La Figura 6.81b e Figura 6.81d illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 14 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta B, in prossimità dello sbocco. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 20 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.81b indica che, nell'intervallo compreso tra i 270 s e i 380 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un innalzamento di pressione, verosimilmente

attribuibile alla fase di saturazione dell'ammasso. In Figura 6.81d si registra che la propagazione della colata viene registrata nella sezione di misura nell'arco temporale compreso tra 380 s e 800 s, inoltre si evidenzia che il colmo della colata nella sezione viene raggiunto a 500 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati.

La Figura 6.81e illustra l'andamento della sonda di livello posta lungo il canale A a 75 cm circa a valle dello sbocco con la canaletta B. Si registra anche in questo caso che a 60 s circa dall'inizio dell'acquisizione dati un aumento di livello conseguente all'inizio del deflusso idrico lungo il canale A. Successivamente si nota un ulteriore aumento di livello nell'intervallo temporale compreso tra 420 s e la fine dell'acquisizione dati dove si evidenzia la fase di propagazione e deposito del materiale sulla sezione di misura, in particolare a 480 s dall'inizio dell'acquisizione dati si evidenzia in Figura 6.81e l'impatto della colata.

La Figura 6.82a e la Figura 6.82c illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso della sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta A, in prossimità dello sbocco della canaletta C. Analogamente a quanto descritto per la canaletta B, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 50 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.82a indica che, a circa 60 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, fenomeno conseguente all'inizio del deflusso idrico nel canale A e al contributo della portata di saturazione che filtra attraverso l'ammasso detritico inizialmente collocato nella canaletta C; fenomeno che viene rilevato dalla sonda di livello accoppiata con un leggero andamento ondulatorio (vedi Figura 6.82c). L'inizio del deposito dei sedimenti convogliati dalla colata detritica generata lungo la canaletta C si realizza attorno ai 420 s. L'impatto della colata viene registrato nella sezione di misura a circa 450 s dall'inizio dell'acquisizione dati. Nell'intervallo di tempo tra 580 s e i 700 s si osserva, sia dalla cella di pressione che dalla sonda di livello, un andamento oscillatorio caratteristico della propagazione della colata composto da fasi di erosione e deposito. Infine nell'intervallo compreso tra i 700 s e la fine della prova, la pressione al fondo subisce un abbassamento verosimilmente attribuibile al drenaggio dell'ammasso.

La Figura 6.82b e la Figura 6.82d illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 14 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta C, in prossimità dello sbocco. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 20 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.82b indica che, a circa 100 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, verosimilmente attribuibile all'erogazione della portata di saturazione. Il passaggio del colmo caratteristico della propagazione della colata viene registrato, sia dalla cella di pressione che dal sensore di livello (Figura 6.82b e Figura 6.82d) nella sezione di misura nell'arco temporale compreso tra 380 s e 540 s. Infine nell'intervallo compreso tra i 540 s e la fine della prova, si nota un andamento costante dei livelli e quindi una condizione stazionaria del deposito.

La Figura 6.82e illustra l'andamento della sonda di livello posta lungo il canale A a 75 cm circa a valle dello sbocco con la canaletta C. Si registra anche in questo caso, a 60 s circa dall'inizio dell'acquisizione dati, un aumento di livello conseguente all'inizio del deflusso idrico lungo il canale A, e successivamente un aumento di livello, anche se

di entità modesta, nell'intervallo temporale compreso tra 420 s e 700 s al trasporto solido conseguente all'erosione del materiale depositato più a monte. Anche in questo caso per tempi superiore ai 700 s si registra un abbassamento di livello dovuto all'arresto del deflusso idrico lungo il canale A.

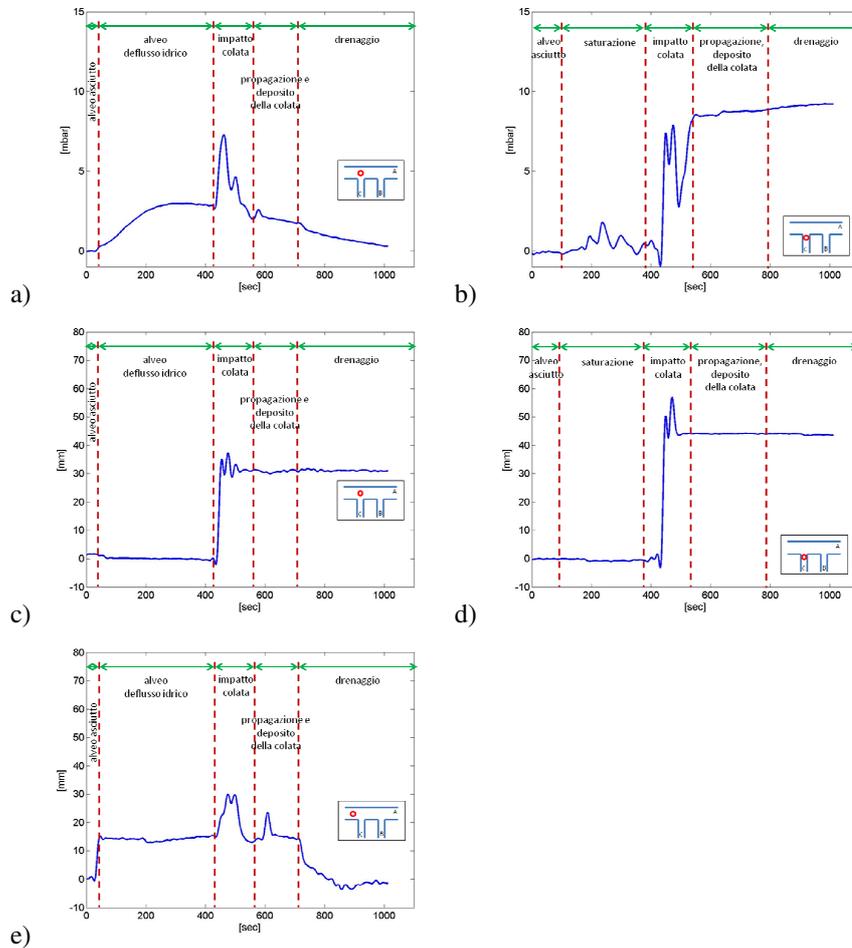


Figura 6.82 Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta C nel canale principale durante la prova 14: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta C; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta C; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.

6.16 Esperimento 15 ($\alpha=90^\circ$, $\beta=17^\circ$, B=C)

L'esperimento no.15 è caratterizzato dai parametri macroscopici e dai parametri idraulici di controllo riportati in Tabella 6.XVI. L'inclinazione della canaletta A è stata fissata a 5° e quelle delle canalette B e C a 17° . Lo strato di materiale posto lungo le canalette laterali è di 10 cm circa e la portata di saturazione degli ammassi è pari a 0.78 l/s, valore strettamente dipendente dalla tipologia di materiale utilizzato e dallo spessore dell'ammasso.

Tabella 6.XVI Parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e parametri idraulici adottati nell'esperimento 15: numero d'ordine della prova, portata fluente nella canaletta principale, angolo di confluenza delle canalette laterali e istanti di innesco delle colate e portata di innesco nelle canalette laterali.

N. exp.	canaletta A	canaletta B			canaletta C		
	Portata [l/s]	Angolo di confluenza	t_0 innesco [s]	Portata di innesco [l/s]	Angolo di confluenza	t_0 innesco [s]	Portata di Innesco [l/s]
15	5.10	90°	0	2.83	90°	0	2.78

Durante l'esperimento sono stati innescati due differenti fenomeni di colate detritiche, che si sono stati propagati contemporaneamente lungo le due canalette laterali (canale B e canale C).

In Figura 6.83, in Figura 6.84 e in Figura 6.85 vengono presentate alcune immagini acquisite alla fine dell'esperimento, in condizioni drenate. In particolare, dalla Figura 6.83 si evincono le forme di deposito realizzatesi lungo il canale A alla fine dell'esperimento. In Figura 6.84a e in Figura 6.84b vengono rappresentate la quantità di materiale eroso durante l'esperimento lungo la canaletta laterale e la forma del deposito allo sbocco per la canaletta B; e in maniera analoga in Figura 6.85a e in Figura 6.85b per la canaletta C.



Figura 6.83 Vista generale dei depositi lungo la canaletta A in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.15 ad esperimento concluso.

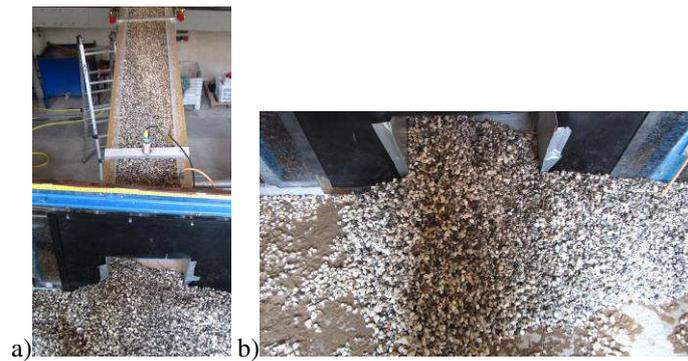


Figura 6.84 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.15 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta B; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta B.

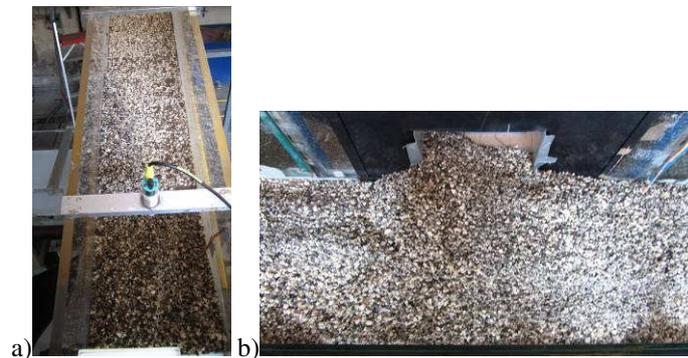


Figura 6.85 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.15 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta C; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta C.

Da queste immagini si osservano i fenomeni di deposito a valle delle canalette B e C: si nota in particolare, come si sia realizzata lungo il canale A un'interazione tra i depositi. In particolare, l'interazione si è realizzata lungo tutto il tratto di canale A compreso tra le due sezioni di sbocco delle colate interessando la sezione idrica del canale per una estensione lineare di circa 25 cm a partire dalla parete dove sono collocati gli sbocchi stessi. Entrambi i depositi presentano uguale forma anche se il deposito sbocco del canale C appare di minore volumetria se confrontato con quello formatosi a valle della canaletta B (vedi Figura 6.85b e Figura 6.86b). Inoltre in Figura 6.85a e in Figura 6.86a si osserva il non coinvolgimento di tutto il materiale a disposizione, in quanto una quota parte del materiale inizialmente disposta lungo le canalette laterali è ancora possibile osservarla nella parte valliva delle stesse. L'erosione del deposito allo sbocco del canale B ha generato un trasporto solido lungo il canale A che ha interagito con il deposito sedimentatosi a valle della canaletta C, determinando la

formazione continua di deposito lungo il tratto di canale che collega i due sbocchi delle canalette laterali (canale B e canale C).

La ricostruzione dei depositi nella canaletta A ottenuta per mezzo di rilievi effettuati con asta graduata viene riportata in Figura 6.86; anche in questo caso si nota l'interazione tra i depositi e il maggiore volume del deposito allo sbocco della canaletta B rispetto a quello formatosi allo sbocco della canaletta C.

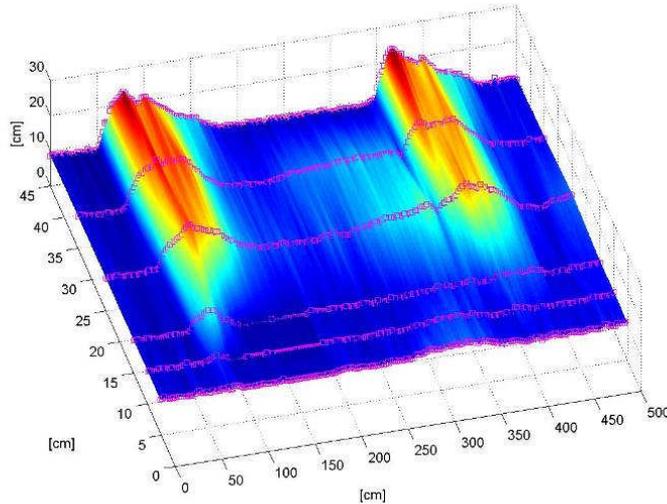


Figura 6.86 Ricostruzione tridimensionale dei depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.15.

In Figura 6.87 e in Figura 6.88 si riportano gli andamenti della variazione della pressione e del livello nel tempo entrambi registrati in funzione della propagazione del fenomeno di colata.

La Figura 6.87a e la Figura 6.87c illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 15 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta A, in prossimità dello sbocco della canaletta B. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 50 cm.

L'andamento del grafico in Figura 6.87a indica che, a circa 1000 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, tale fenomeno è verosimilmente attribuibile all'erogazione di portata nel canale principale (A). L'inizio del deposito dei sedimenti convogliati dalla colata detritica, generata lungo la canaletta B, si realizza attorno ai 12500s. Nell'intervallo di tempo compreso tra i 12500 s e i 13500 s, si registra un notevole innalzamento dei valori acquisiti sia dalla cella di pressione che dalla sonda di livello (Figura 6.87a e Figura 6.87c). In particolare, la cella di pressione evidenzia, l'impatto dinamico della colata detritica sul fondo durante la fase di progressivo accrescimento del deposito individuabile in Figura 6.87a nella fase di picco a circa 13000 s. Infine nell'intervallo compreso tra i 13000 s e la fine

dell'esperimento si osserva un abbassamento nell'andamento delle pressioni (Figura 6.87a) conseguente alla fase di drenaggio dell'ammasso.

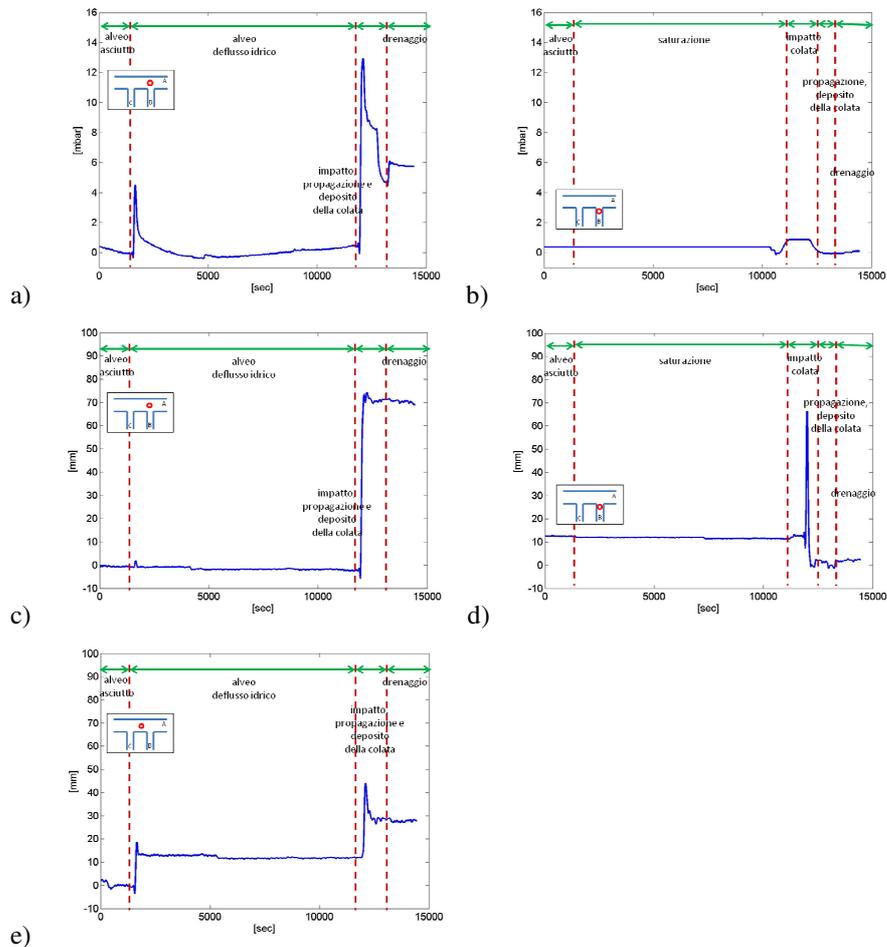


Figura 6.87 Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta B nel canale principale durante la prova 15: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta B; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta B; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.

La Figura 6.87b e la Figura 6.87d illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 15 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta B, in prossimità dello sbocco. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad

ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 20 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.87b e quello in Figura 6.87d evidenziano che la propagazione della colata viene registrata nella sezione di misura nell'arco temporale compreso tra 11000 s e 13000 s, inoltre si evidenzia che il colmo della colata nella sezione viene raggiunto a 12500 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati.

La Figura 6.87e illustra l'andamento della sonda di livello posta lungo il canale A a 75 cm circa a valle dello sbocco con la canaletta B. Si registra anche in questo caso che a 1000 s circa dall'inizio dell'acquisizione dati un aumento di livello conseguente all'inizio del deflusso idrico lungo il canale A. Successivamente si nota un ulteriore aumento di livello nell'intervallo temporale compreso tra 12500 s e 13500 s si evidenzia la fase di propagazione e deposito del materiale sulla sezione di misura, in particolare l'impatto della colata si registra a 13000 s dall'inizio dell'acquisizione dati. Infine nell'arco temporale compreso tra i 13000 s e la fine dell'acquisizione dati si osserva un abbassamento di livello dovuto all'interruzione dell'erogazione di portata lungo il canale A.

La Figura 6.88a e Figura 6.88c illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta A, in prossimità dello sbocco della canaletta C. Analogamente a quanto descritto per la canaletta B, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 50 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.88a indica che, a circa 1000 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, fenomeno conseguente all'inizio del deflusso idrico nel canale A e al contributo della portata di saturazione che filtra attraverso l'ammasso detritico inizialmente collocato nella canaletta C; fenomeno che viene rilevato dalla sonda di livello accoppiata con un leggero andamento ondulatorio (vedi Figura 6.88c). L'inizio del deposito dei sedimenti convogliati dalla colata detritica generata lungo la canaletta C si realizza attorno ai 12500 s. L'impatto della colata viene registrato nella sezione di misura a circa 13000 s dall'inizio dell'acquisizione dati. Nell'intervallo di tempo tra 13500 s e la fine della prova la pressione al fondo subisce un abbassamento verosimilmente attribuibile al drenaggio dell'ammasso e alla fine del deflusso lungo il canale A.

La Figura 6.88b e la Figura 6.88d illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 15 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta C, in prossimità dello sbocco. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 20 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.88b indica che, a circa 1000 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un andamento oscillatorio, verosimilmente attribuibile all'erogazione della portata di saturazione. Il passaggio del colmo caratteristico della propagazione della colata viene registrato, sia dalla cella di pressione che dal sensore di livello (Figura 4b e 4d) nella sezione di misura nell'arco temporale compreso tra 11000 s e 12500 s.

La Figura 6.88e illustra l'andamento della sonda di livello posta lungo il canale A a 75 cm circa a valle dello sbocco con la canaletta C. Si registra anche in questo caso, a 1000 s circa dall'inizio dell'acquisizione dati, un aumento di livello conseguente all'inizio del deflusso idrico lungo il canale A, e successivamente un aumento di livello, anche se di entità modesta, nell'intervallo temporale compreso tra 12500 s e 13500 s al

trasporto solido conseguente all'erosione del materiale depositato più a monte. Anche in questo caso per tempi superiore ai 13500 s si registra un abbassamento di livello dovuto all'arresto del deflusso idrico lungo il canale A.

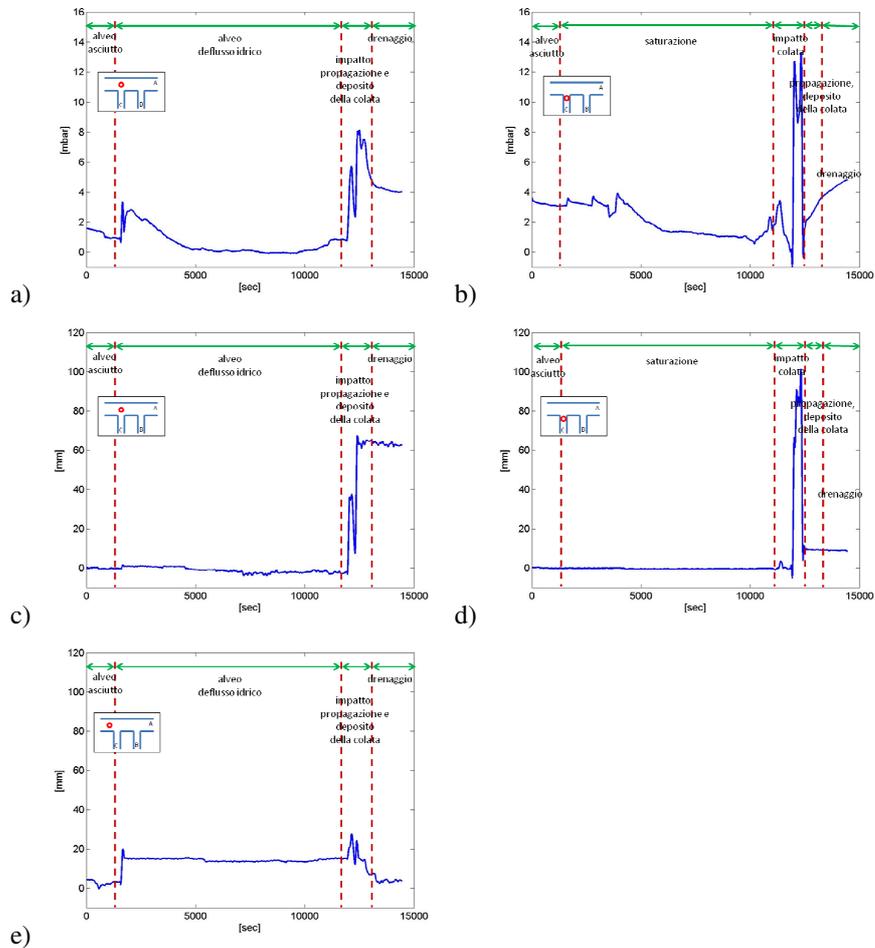


Figura 6.88 Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta C nel canale principale durante la prova 15: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta C; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta C; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.

6.17 Esperimento 16 ($\alpha=90^\circ$, $\beta=17^\circ$, B->C)

L'esperimento no.16 è caratterizzato dai parametri macroscopici e dai parametri idraulici di controllo riportati in Tabella 6.XVII. L'inclinazione della canaletta A è stata fissata a 5° e quelle delle canalette B e C a 17° . Lo strato di materiale posto lungo le canalette laterali è di 10 cm circa e la portata di saturazione degli ammassi è pari a 0.78 l/s, valore strettamente dipendente dalla tipologia di materiale utilizzato e dallo spessore dell'ammasso.

Tabella 6.XVII Parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e parametri idraulici adottati nell'esperimento 16: numero d'ordine della prova, portata fluente nella canaletta principale, angolo di confluenza delle canalette laterali e istanti di innesco delle colate e portata di innesco nelle canalette laterali.

N. exp.	canaletta A	canaletta B			canaletta C		
	Portata [l/s]	Angolo di confluenza	t_0 innesco [s]	Portata di innesco [l/s]	Angolo di confluenza	t_0 innesco [s]	Portata di Innesco [l/s]
16	5.08	90°	0	3.05	90°	235	2.91

Durante l'esperimento sono stati innescati due differenti fenomeni di colate detritiche, che si sono propagati contemporaneamente lungo le due canalette laterali (canale B e canale C).

In Figura 6.89, in Figura 6.90 e in Figura 6.91 vengono presentate alcune immagini acquisite alla fine dell'esperimento, in condizioni drenate. In particolare, dalla Figura 6.89 si evincono le forme di deposito realizzatesi lungo il canale A alla fine dell'esperimento. In Figura 6.90a e in Figura 6.90b vengono rappresentate la quantità di materiale eroso durante l'esperimento lungo la canaletta laterale e la forma del deposito allo sbocco per la canaletta B; e in maniera analoga in Figura 6.91a e in Figura 6.91b per la canaletta C.



Figura 6.89 Vista generale dei depositi lungo la canaletta A in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.16 ad esperimento concluso.



Figura 6.90 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.16 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta B; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta B.

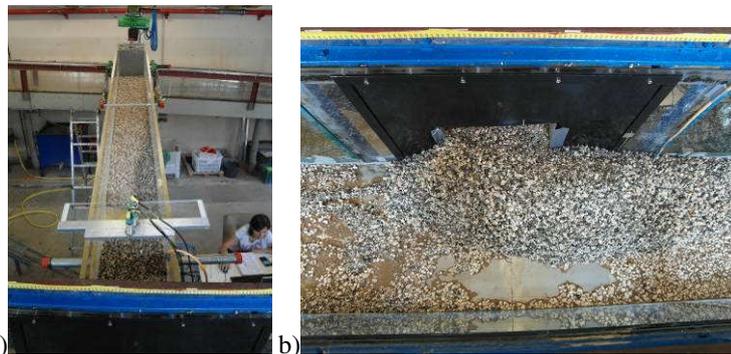


Figura 6.91 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.16 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta C; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta C.

Da queste immagini si osservano i fenomeni di deposito a valle delle canalette B e C: si nota in particolare, come si sia realizzata lungo il canale A un'interazione tra i depositi. In particolare, l'interazione si è realizzata lungo tutto il tratto di canale A compreso tra le due sezioni di sbocco delle colate interessando la sezione idrica del canale per una estensione lineare di circa 15 cm a partire dalla parete dove sono collocati gli sbocchi stessi. Entrambi i depositi presentano uguale forma anche se il deposito sbocco del canale B appare di minore volumetria se confrontato con quello formatosi a valle della canaletta C (vedi Figura 6.90b e Figura 6.91b).

L'erosione del deposito allo sbocco del canale B ha generato un trasporto solido lungo il canale A che ha interagito con il deposito sedimentatosi a valle della canaletta C, determinando la formazione continua di deposito lungo il tratto di canale che collega i due sbocchi delle canalette laterali (canale B e canale C).

La ricostruzione dei depositi nella canaletta A ottenuta per mezzo di rilievi effettuati con asta graduata viene riportata in Figura 6.92; anche in questo caso si nota

l'interazione tra i depositi e il maggiore volume del deposito allo sbocco della canaletta C rispetto a quello formatosi allo sbocco della canaletta B.

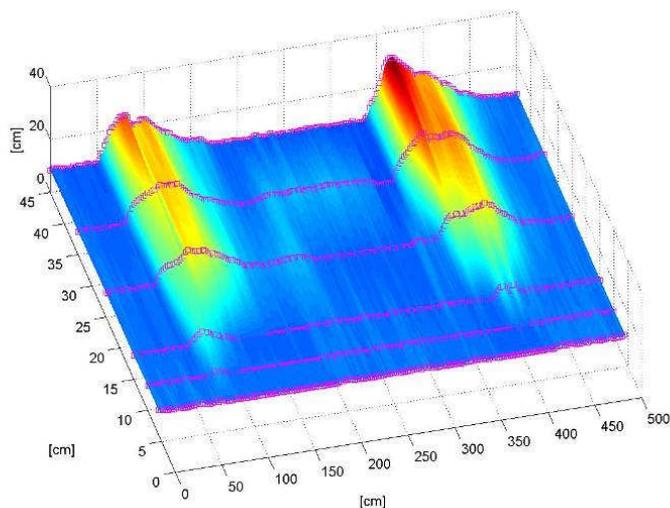


Figura 6.92 Ricostruzione tridimensionale dei depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.16.

In Figura 6.93 e in Figura 6.94 si riportano gli andamenti della variazione della pressione e del livello nel tempo entrambi registrati in funzione della propagazione del fenomeno di colata.

La Figura 6.93a e la Figura 6.93c illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 16 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta A, in prossimità dello sbocco della canaletta B. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 50 cm. L'accoppiamento tra la sonda di livello e la cella di pressione consente di cogliere alcuni interessanti aspetti della dinamica che caratterizza l'evoluzione e il deposito della colata. L'andamento del grafico in Figura 6.93a indica che, a circa 200 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, della durata di circa 350 s. Tale fenomeno è verosimilmente attribuibile all'aumento di portata nel canale principale (A) dovuto al contributo della portata di saturazione che filtra attraverso l'ammasso detritico inizialmente collocato nella canaletta C. Tale fenomeno invece viene avvertito dalla sonda di livello accoppiata con un leggero andamento ondulatorio (vedi Figura 6.93c). L'inizio del deposito dei sedimenti convogliati dalla colata detritica, generata lungo la canaletta B, si realizza attorno ai 550s. Nell'intervallo di tempo tra 550 s e 1050 s si registra un notevole innalzamento dei valori acquisiti sia dalla cella di pressione che dalla sonda di livello. In particolare, la cella di pressione evidenzia, l'impatto dinamico della colata detritica sul fondo durante la fase di progressivo accrescimento del deposito individuato da un picco di pressione registrato a 600 s.

Infine nell'intervallo compreso tra i 1100 s e la fine della prova, la pressione al fondo subisce un abbassamento verosimilmente attribuibile al drenaggio dell'ammasso.

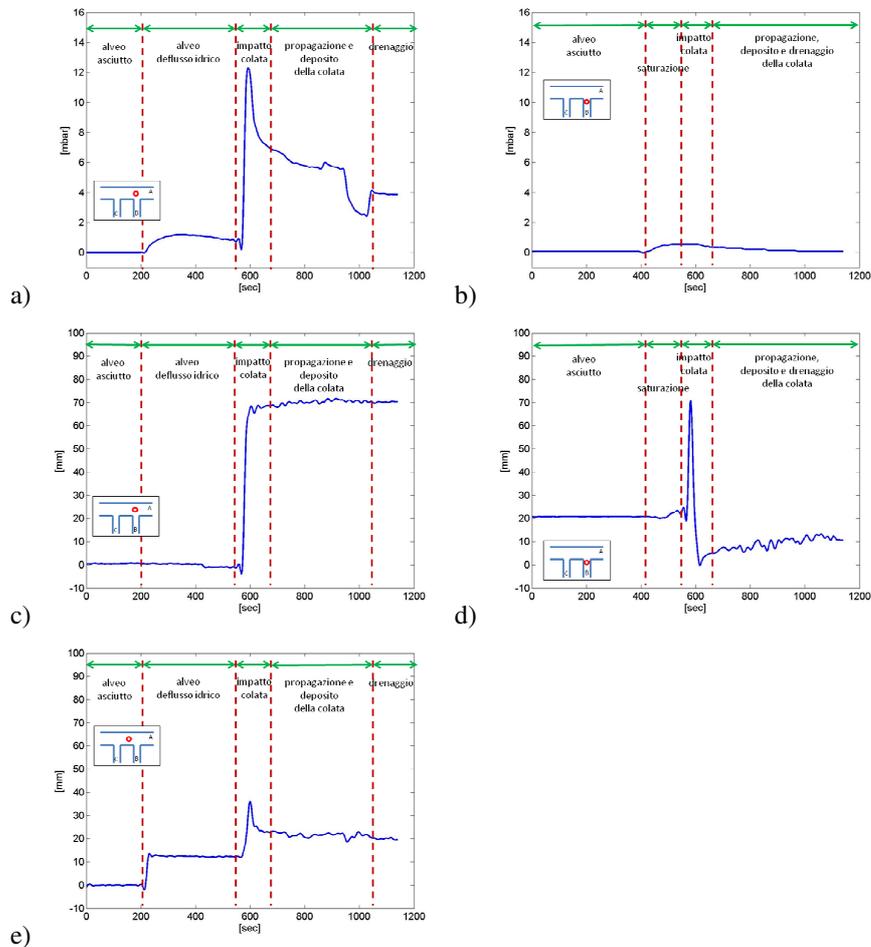


Figura 6.93 Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta B nel canale principale durante la prova 16: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta B; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta B; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.

La Figura 6.93b e la Figura 6.93d illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 16 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta B, in prossimità dello sbocco. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad

ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 20 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.93b indica che, a circa 400 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, verosimilmente attribuibile all'erogazione della portata di saturazione. Mentre in Figura 6.93d si registra che la propagazione della colata viene registrata nella sezione di misura nell'arco temporale compreso tra 500 s e 650 s, il passaggio del colmo della propagazione della colata viene rilevato nella sezione di misura a 580s dall'inizio dell'acquisizione dati. Infine nell'intervallo compreso tra i 650 s e la fine della prova, la pressione al fondo e il livello della superficie subiscono un abbassamento verosimilmente attribuibili all'arresto dell'erogazione di portata lungo il canale B.

La Figura 6.93e illustra l'andamento della sonda di livello posta lungo il canale A a 75 cm circa a valle dello sbocco con la canaletta B. Si registra anche in questo caso che a 200 s circa dall'inizio dell'acquisizione dati un aumento di livello conseguente all'inizio del deflusso idrico lungo il canale A, e successivamente un aumento di livello, anche se di entità modesta, nell'intervallo temporale compreso tra 550 s e 1050 s al trasporto solido conseguente all'erosione del materiale depositato più a monte. Anche in questo caso per tempi superiori ai 1050 s si registra un abbassamento di livello dovuto all'arresto del deflusso idrico lungo il canale A.

La Figura 6.94a e la Figura 6.94c illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta A, in prossimità dello sbocco della canaletta C. Analogamente a quanto descritto per la canaletta B, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 50 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.94a indica che, a circa 200 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, fenomeno conseguente all'inizio del deflusso idrico nel canale A. L'inizio del deposito dei sedimenti convogliati dalla colata detritica, generata lungo la canaletta C, si realizza attorno ai 570s. Nell'intervallo di tempo tra 570 s e 970 s si osserva un notevole innalzamento dei valori acquisiti sia dalla cella di pressione che dalla sonda di livello, fenomeno conseguente al passaggio dell'onda di piena, l'impatto della colata si registra a circa 850 s dall'inizio di acquisizione dei dati. Infine nell'intervallo compreso tra i 970 s e la fine della prova, la pressione al fondo subisce un abbassamento verosimilmente attribuibile al drenaggio dell'ammasso.

La Figura 6.94b e la Figura 6.94d illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 16 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta C, in prossimità dello sbocco. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 20 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.94b e quello in Figura 6.94d indicano che, a circa 210 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, verosimilmente attribuibile alla fase di saturazione dell'ammasso. La propagazione della colata viene registrata nella sezione di misura nell'arco temporale compreso tra 780 s e 830 s, mentre il passaggio del colmo dell'onda di propagazione della colata avviene a circa 800 s. Infine nell'intervallo compreso tra i 830 s e la fine della prova, la pressione al fondo subisce un abbassamento verosimilmente attribuibile all'arresto di erogazione di portata lungo il canale C.

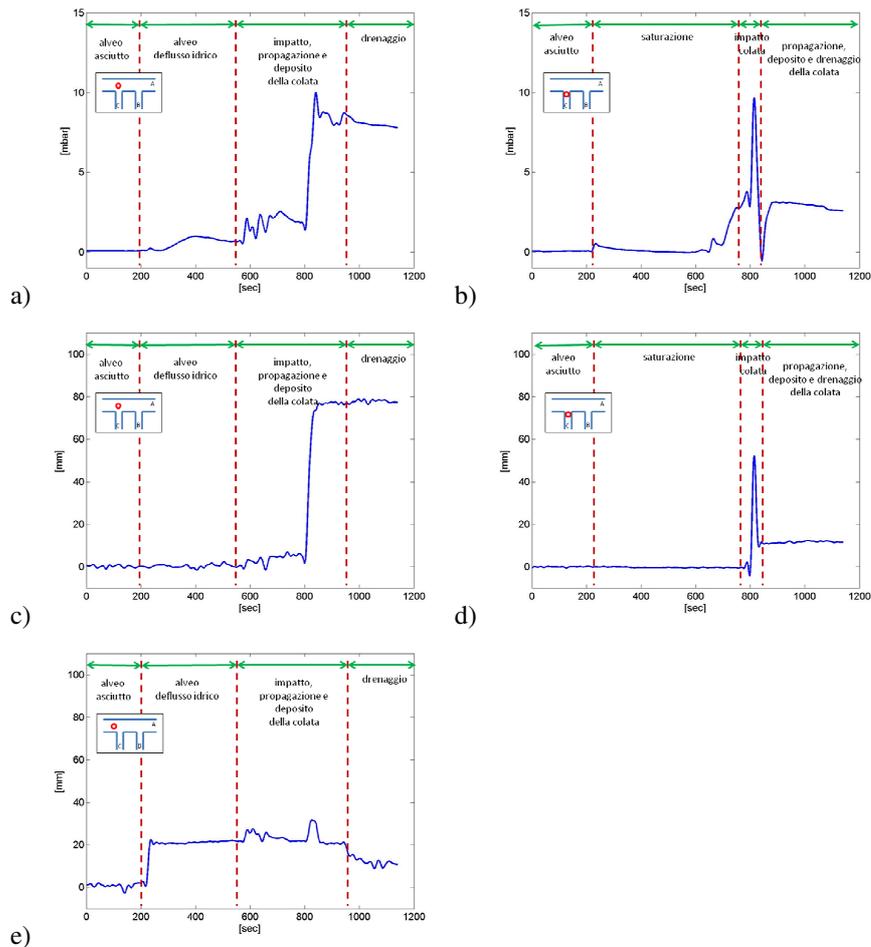


Figura 6.94 Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta C nel canale principale durante la prova 16: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta C; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta C; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.

La Figura 6.94e illustra l'andamento della sonda di livello posta lungo il canale A a 75 cm circa a valle dello sbocco con la canaletta C. Si registra anche in questo caso, a 200 s circa dall'inizio dell'acquisizione dati, un aumento di livello conseguente all'inizio del deflusso idrico lungo il canale A, e successivamente un aumento di livello, anche se di entità modesta, nell'intervallo temporale compreso tra 570s e 970 s al trasporto solido conseguente all'erosione del materiale depositato più a monte. Anche in

questo caso per tempi superiori ai 970 s si registra un abbassamento di livello dovuto all'arresto del deflusso idrico lungo il canale A.

6.18 Esperimento 17 ($\alpha=90^\circ$, $\beta=17^\circ$, C->B)

L'esperimento no.17 è caratterizzato dai parametri macroscopici e dai parametri idraulici di controllo riportati in Tabella 6.XVIII. L'inclinazione della canaletta A è stata fissata a 5° e quelle delle canalette B e C a 17° . Lo strato di materiale posto lungo le canalette laterali è di 10 cm circa e la portata di saturazione degli ammassi è pari a 0.78 l/s, valore strettamente dipendente dalla tipologia di materiale utilizzato e dallo spessore dell'ammasso.

Tabella 6.XVIII Parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e parametri idraulici adottati nell'esperimento 17: numero d'ordine della prova, portata fluente nella canaletta principale, angolo di confluenza delle canalette laterali e istanti di innesco delle colate e portata di innesco nelle canalette laterali.

N. exp.	canaletta A	canaletta B			canaletta C		
	Portata [l/s]	Angolo di confluenza	t_0 innesco [s]	Portata di innesco [l/s]	Angolo di confluenza	t_0 innesco [s]	Portata di innesco [l/s]
17	5.08	90°	158	3.05	90°	0	2.93

Durante l'esperimento sono stati propagati due differenti fenomeni di colata, il primo è stato generato nel canale C e il secondo nel canale B.

In Figura 6.95 è presentata una immagine acquisita alla fine dell'esperimento che raffigura il materiale depositato lungo il canale A. In Figura 6.96 e in Figura 6.97 vengono riportate le immagini sempre acquisite a fine prova e in condizioni drenate del deposito lungo i canali B e C (Figura 6.96a e Figura 6.97a) deposito a valle dei canali B e C (Figura 6.96b e Figura 6.97b).



Figura 6.95 Vista generale dei depositi lungo la canaletta A in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.17 ad esperimento concluso.



Figura 6.96 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.17 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta B; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta B.

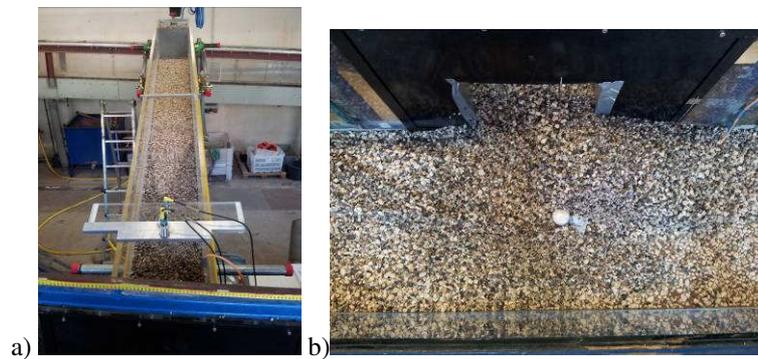


Figura 6.97 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.17 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta C; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta C.

Da queste immagini si osserva sia l'interferenza tra i depositi che ha una estensione lungo l'asse trasversale del canale A di circa 25 cm, sia la maggiore volumetria del deposito a valle del canale B rispetto a quello a valle del canale C.

La ricostruzione del rilievo di materiale depositato a fine esperimento lungo il canale A viene presentata in Figura 6.98.

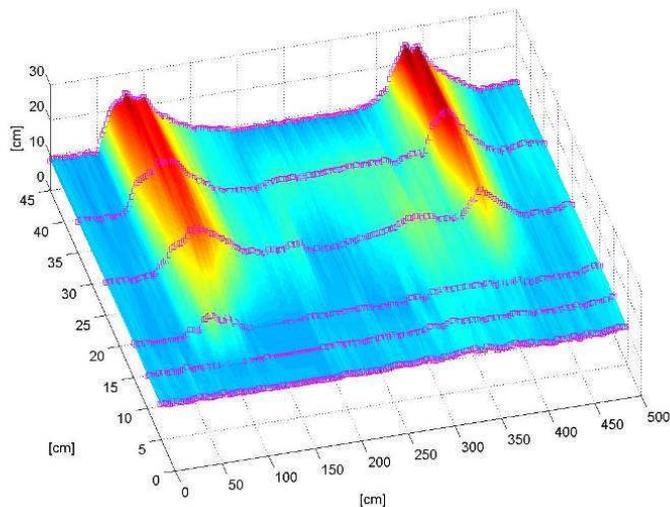


Figura 6.98 Ricostruzione tridimensionale dei depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.17.

In Figure 6.99 e in Figura 6.100 si riportano gli andamenti della variazione della pressione e del livello nel tempo entrambi registrati in funzione della propagazione del fenomeno di colata.

La Figura 6.99a e la Figura 6.99c illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 17 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta A, in prossimità dello sbocco della canaletta B. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 50 cm.

L'andamento del grafico in Figura 6.99a indica che, a circa 60 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, tale fenomeno è verosimilmente attribuibile all'erogazione di portata nel canale principale (A). L'inizio del deposito dei sedimenti convogliati dalla colata detritica, generata lungo la canaletta B, si realizza attorno ai 980 s. Nell'intervallo di tempo compreso tra i 980 s e i 1200 s, si registra un notevole innalzamento dei valori acquisiti sia dalla cella di pressione che dalla sonda di livello (Figura 6.99a e Figura 6.99c). In particolare, la cella di pressione (Figura 6.99a) evidenzia, l'impatto dinamico della colata detritica sul fondo durante la fase di progressivo accrescimento del deposito individuato da un picco di pressione registrato a 1050 s dall'inizio di acquisizione dei dati. Infine nell'intervallo compreso tra i 1150 s e la fine dell'esperimento si osserva attraverso l'abbassamento d'andamento registrato sia dalla cella di pressione che dal sensore di livello la fase di drenaggio dell'ammasso.

La Figura 6.99b e la Figura 6.99d illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 17 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta B, in prossimità dello sbocco. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad

ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 20 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.99b indica che, a circa 100 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un innalzamento di pressione, verosimilmente attribuibile all'erogazione della portata di saturazione. In Figura 6.99d si registra che la propagazione della colata viene registrata nella sezione di misura nell'arco temporale compreso tra 900 s e 1200 s, inoltre si evidenzia che il colmo della colata nella sezione viene raggiunto a 1100 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati.

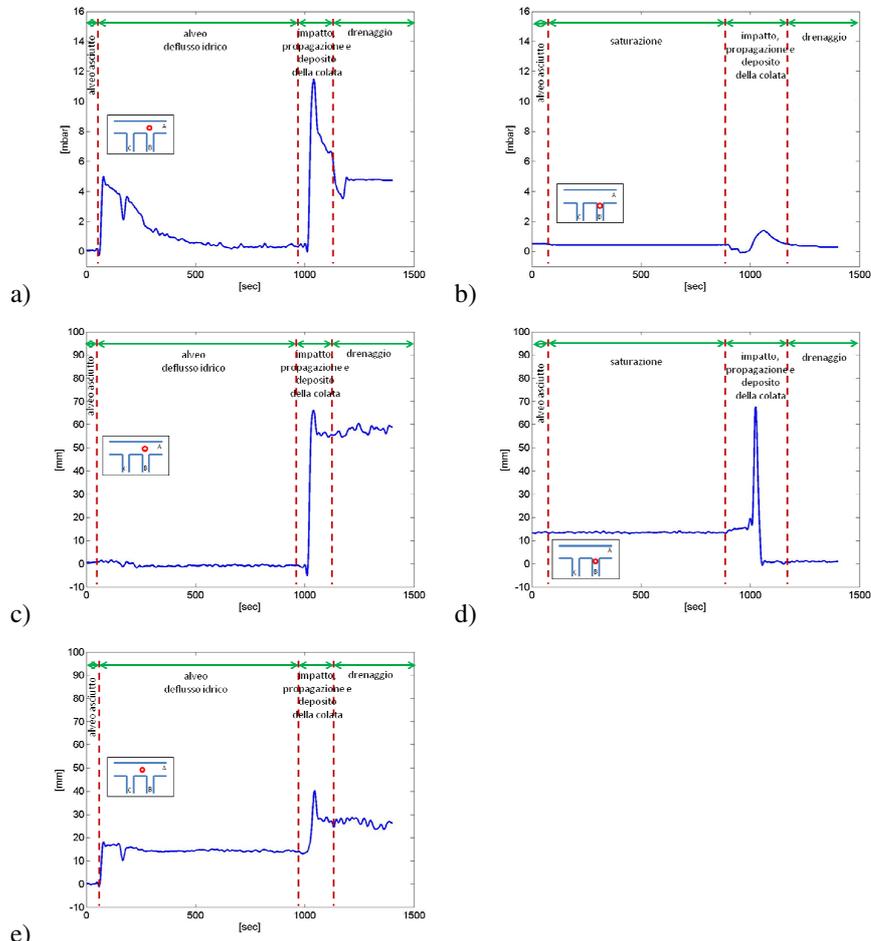


Figura 6.99 Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta B nel canale principale durante la prova 17: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta B; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta B; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.

La Figura 6.99e illustra l'andamento della sonda di livello posta lungo il canale A a 75 cm circa a valle dello sbocco con la canaletta B. Si registra anche in questo caso che a 60 s circa dall'inizio dell'acquisizione dati un aumento di livello conseguente all'inizio del deflusso idrico lungo il canale A, e successivamente un aumento di livello, anche se di entità modesta, nell'intervallo temporale compreso tra 980 s e 1150 s al trasporto solido conseguente all'erosione del materiale depositato più a monte. Anche in questo caso per tempi superiori ai 1150 s si registra un abbassamento di livello dovuto all'arresto del deflusso idrico lungo il canale A.

La Figura 6.100a e la Figura 6.100c illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta A, in prossimità dello sbocco della canaletta C. Analogamente a quanto descritto per la canaletta B, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 50 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.100a indica che, a circa 60 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, fenomeno conseguente all'inizio del deflusso idrico nel canale A e al contributo della portata di saturazione che filtra attraverso l'ammasso detritico inizialmente collocato nella canaletta C; fenomeno che viene rilevato dalla sonda di livello accoppiata con un leggero andamento ondulatorio (vedi Figura 6.100c). L'inizio del deposito dei sedimenti convogliati dalla colata detritica generata lungo la canaletta C si realizza attorno ai 8500 s. Nell'intervallo di tempo tra 800 s e i 1200s si osserva un notevole innalzamento dei valori acquisiti sia dalla cella di pressione che dalla sonda di livello, fenomeno conseguente al passaggio dell'onda di piena e al depositarsi del materiale al fondo. In particolare la cella di pressione identifica la fase di deposizione del materiale come composta da due fasi, identificabili dall'andamento del grafico in Figura 4 attraverso i due picchi realizzatisi a 900 s e 1050 s. Infine nell'intervallo compreso tra i 1200 s e la fine della prova, la pressione al fondo e il livello della superficie subiscono un abbassamento verosimilmente attribuibili al drenaggio dell'ammasso.

La Figura 6.100b e la Figura 6.100d illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 17 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta C, in prossimità dello sbocco. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 20 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.100b indica che, a circa 800 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, verosimilmente attribuibile all'erogazione della portata di saturazione. Mentre in Figura 6.100d si registra che la propagazione della colata viene registrata nella sezione di misura nell'arco temporale compreso tra 800 s e 1200 s. Il passaggio del colmo della colata viene rilevato sia dalla cella di pressione che dal sensore di livello a 900 s dall'inizio di acquisizione dati. Infine nell'intervallo compreso tra i 1200 s.

La Figura 6.100e illustra l'andamento della sonda di livello posta lungo il canale A a 75 cm circa a valle dello sbocco con la canaletta C. Si registra anche in questo caso, a 60 s circa dall'inizio dell'acquisizione dati, un aumento di livello conseguente all'inizio del deflusso idrico lungo il canale A, e successivamente un aumento di livello, anche se di entità modesta, nell'intervallo temporale compreso tra 800 s e 1200 s al trasporto solido conseguente all'erosione del materiale depositato più a monte. Anche in questo

caso per tempi superiore ai 1200 s si registra un abbassamento di livello dovuto all'arresto del deflusso idrico lungo il canale A.

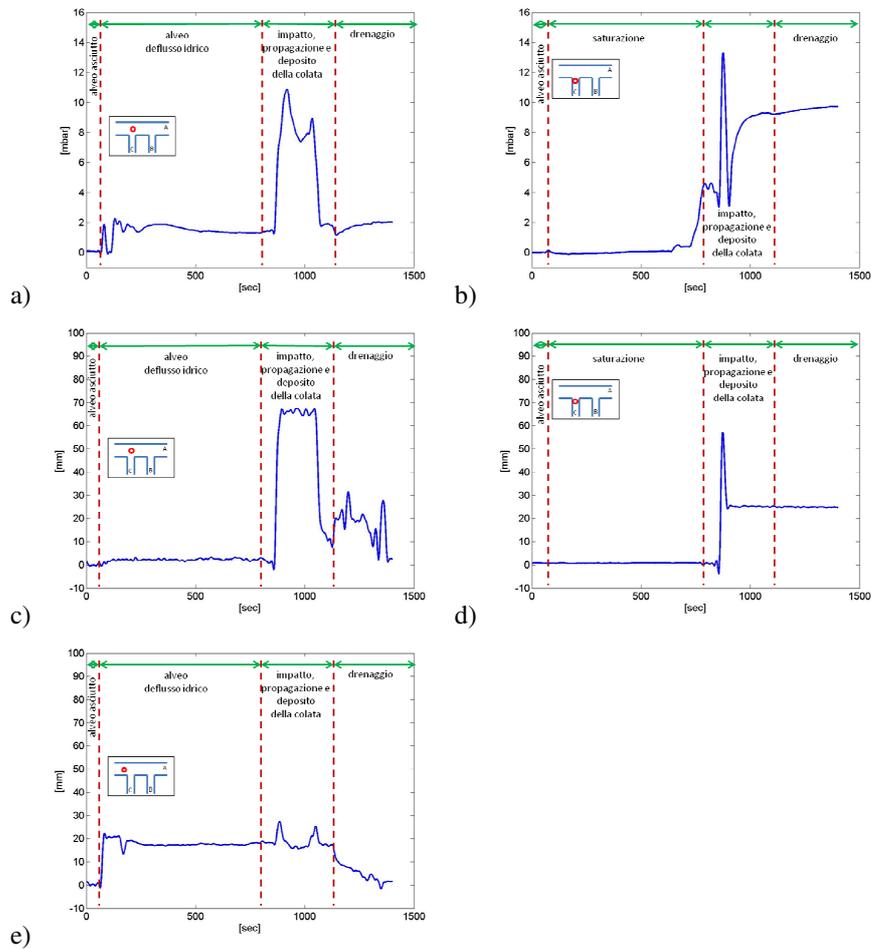


Figura 6.100 Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta C nel canale principale durante la prova 17: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta C; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta C; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.

6.19 Esperimento 18 ($\alpha=90^\circ$, $\beta=15^\circ$, B->C)

L'esperimento no.18 è caratterizzato dai parametri macroscopici e dai parametri idraulici di controllo riportati in Tabella 6.XIX. L'inclinazione della canaletta A è stata fissata a 5° e quelle delle canalette B e C a 15° . Lo strato di materiale posto lungo le canalette laterali è di 10 cm circa e la portata di saturazione degli ammassi è pari a 0.78 l/s, valore strettamente dipendente dalla tipologia di materiale utilizzato e dallo spessore dell'ammasso.

Tabella 6.XIX Parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e parametri idraulici adottati nell'esperimento 18: numero d'ordine della prova, portata fluente nella canaletta principale, angolo di confluenza delle canalette laterali e istanti di innesco delle colate e portata di innesco nelle canalette laterali.

N. exp.	canaletta A	canaletta B			canaletta C		
	Portata [l/s]	Angolo di confluenza	t_0 innesco [s]	Portata di innesco [l/s]	Angolo di Confluenza	t_0 innesco [s]	Portata di innesco [l/s]
18	5.00	90°	0	3.05	90°	206	2.95

Durante l'esperimento si sono innescati due differenti colate detritiche. Inizialmente si è innescata la colata lungo la canaletta di monte (canaletta B) e successivamente, dopo circa 3 minuti e mezzo, si è innescata la colata nella canaletta a valle (Canale C).

In Figura 6.101, in Figura 6.102 e in Figura 6.103 vengono presentate alcune immagini acquisite alla fine dell'esperimento, in condizioni drenate. In particolare, dalle Figura 6.101 si evincono le forme di deposito allo stadio finale per l'intera estensione del canale A. In Figura 6.102a e in Figura 6.102b vengono rappresentate la quantità di materiale eroso durante l'esperimento lungo la canaletta laterale e la forma del deposito allo sbocco per la canaletta B; e in maniera analoga in Figura 6.103a e in Figura 6.103b per la canaletta C.

Da queste immagini si osservano i fenomeni di deposito a valle delle canalette B e C: si osserva, in particolare, la forte interazione tra i fenomeni di deposito, condizione resa evidente in Figura 6.101 dove è facile distinguere una zona di deposito tra i due sbocchi di larghezza 20 cm circa.



Figura 6.101 Vista generale dei depositi lungo la canaletta A in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n. 18 ad esperimento concluso.



Figura 6.102 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.18 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta B; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta B.

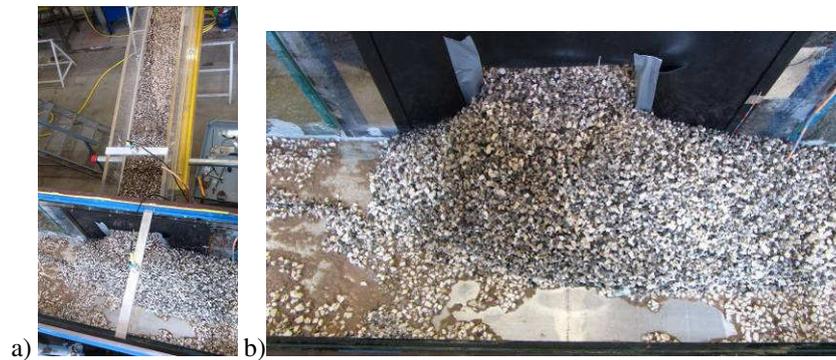


Figura 6.103 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.18 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta C; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta C.

La ricostruzione dei depositi nella canaletta A ottenuta per mezzo di rilievi effettuati con asta graduata viene riportata in Figura 6.104. Si evidenzia una importante interazione tra i depositi e inoltre si osservano volumetrie simili.

Dal confronto delle immagini (Figura 6.101) e del rilievo effettuato (Figura 6.104) è subito evidente l'interferenza tra i due depositi.

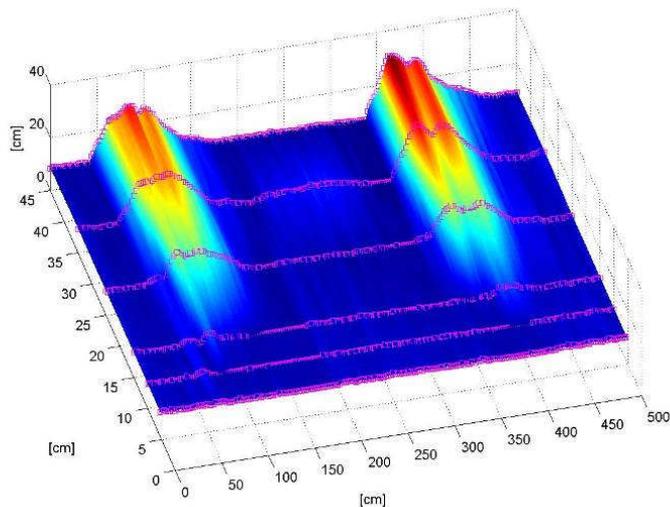


Figura 6.104 Ricostruzione tridimensionale dei depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.18.

In Figura 6.105 e in Figura 6.106 si riportano gli andamenti della variazione della pressione e del livello nel tempo entrambi registrati in funzione della propagazione del fenomeno di colata.

La Figura 6.105a e la Figura 6.105c illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 18 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta A, in prossimità dello sbocco della canaletta B. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 50 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.105a indica che, a circa 260 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, della durata di circa 320 s. Tale fenomeno è verosimilmente attribuibile all'aumento di portata nel canale principale (A) dovuto al contributo della portata di saturazione che filtra attraverso l'ammasso detritico inizialmente collocato nella canaletta C. Tale fenomeno invece viene avvertito dalla sonda di livello accoppiata con un leggero andamento ondulatorio (vedi Figura 6.105c). L'inizio del deposito dei sedimenti convogliati dalla colata detritica, generata lungo la canaletta B, si realizza attorno ai 580 s. Nell'intervallo di tempo tra 590 s e 700 s si registra un notevole innalzamento dei valori acquisiti sia dalla cella di pressione che dalla sonda di livello. In particolare, la cella di pressione evidenzia, l'impatto dinamico della colata detritica sul fondo durante la fase di progressivo accrescimento del deposito individuato da un picco di pressione registrato a 610 s. Nell'intervallo di tempo tra 700 s e 970 s si osserva un comportamento abbastanza stazionario del deposito, verosimilmente legato all'alternarsi di fasi di accrescimento e erosione del deposito in equilibrio dinamico tra loro. Infine nell'intervallo compreso tra i 970 s e la fine della prova, la pressione al fondo subisce un abbassamento verosimilmente attribuibile al drenaggio dell'ammasso.

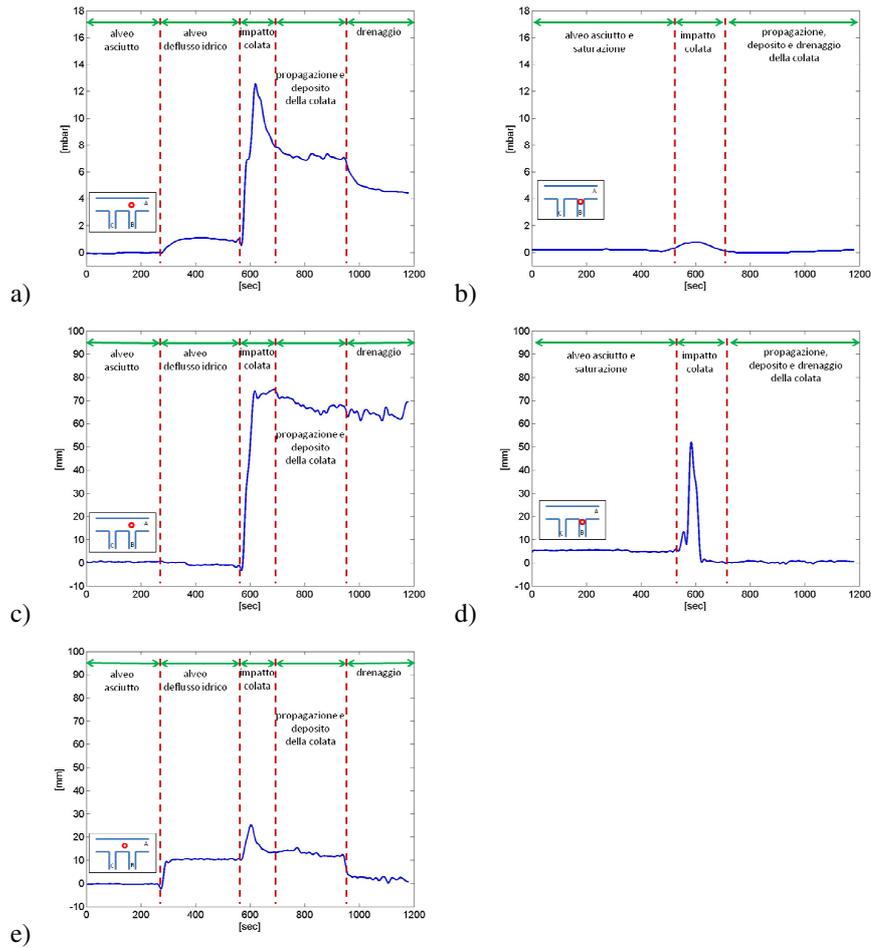


Figura 6.105 Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta B nel canale principale durante la prova 18: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta B; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta B; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.

La Figura 6.105b e la Figura 6.105d illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 18 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta B, in prossimità dello sbocco. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 20 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.105b indica che, a circa 540 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, verosimilmente attribuibile all'erogazione della portata di

saturazione. Mentre in Figura 6.105d si registra che la propagazione della colata viene registrata nella sezione di misura nell'arco temporale compreso tra 540 s e 740 s, il passaggio del colmo della propagazione della colata viene rilevato nella sezione di misura a 610s dall'inizio dell'acquisizione dati. Infine nell'intervallo compreso tra i 740 s e la fine della prova, la pressione al fondo e il livello della superficie subiscono un abbassamento verosimilmente attribuibili all'arresto dell'erogazione di portata lungo il canale B.

La Figura 6.105e illustra l'andamento della sonda di livello posta lungo il canale A a 75 cm circa a valle dello sbocco con la canaletta B. Si registra anche in questo caso che a 260 s circa dall'inizio dell'acquisizione dati un aumento di livello conseguente all'inizio del deflusso idrico lungo il canale A, e successivamente un aumento di livello, anche se di entità modesta, nell'intervallo temporale compreso tra 590s e 970 s al trasporto solido conseguente all'erosione del materiale depositato più a monte. Anche in questo caso per tempi superiori ai 970 s si registra un abbassamento di livello dovuto all'arresto del deflusso idrico lungo il canale A.

La Figura 6.106a e la Figura 6.106c illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta A, in prossimità dello sbocco della canaletta C. Analogamente a quanto descritto per la canaletta B, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 50 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.106a indica che, a circa 260 s inizia il deflusso lungo il canale A. L'inizio del deposito dei sedimenti convogliati dalla colata detritica, generata lungo la canaletta C, si realizza attorno ai 780s. Nell'intervallo di tempo tra 780 s e 950 s si osserva un notevole innalzamento dei valori acquisiti sia dalla cella di pressione che dalla sonda di livello, fenomeno conseguente al passaggio dell'onda di piena, l'impatto della colata si registra a circa 820 s dall'inizio di acquisizione dei dati. Infine nell'intervallo compreso tra i 950 s e la fine della prova, la pressione al fondo e il livello della superficie subiscono un abbassamento verosimilmente attribuibili al drenaggio dell'ammasso.

La Figura 6.106b e la Figura 6.106d illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 18 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta C, in prossimità dello sbocco. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 20 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.106b e quello in Figura 6.106d indicano che, a circa 260 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, verosimilmente attribuibile alla fase di saturazione della colata. La propagazione della colata viene registrata nella sezione di misura nell'arco temporale compreso tra 700 s e 850 s, mentre il passaggio del colmo dell'onda di propagazione della colata avviene a circa 800 s. Infine nell'intervallo compreso tra i 850 s e la fine della prova, la pressione al fondo subisce un abbassamento verosimilmente attribuibile all'arresto di erogazione di portata lungo il canale C.

La Figura 6.106e illustra l'andamento della sonda di livello posta lungo il canale A a 75 cm circa a valle dello sbocco con la canaletta C. Si registra anche in questo caso, a 260 s circa dall'inizio dell'acquisizione dati, un aumento di livello conseguente all'inizio del deflusso idrico lungo il canale A, e successivamente un aumento di livello,

anche se di entità modesta, nell'intervallo temporale compreso tra 780s e 950 s al trasporto solido conseguente all'erosione del materiale depositato più a monte. Anche in questo caso per tempi superiori ai 950 s si registra un abbassamento di livello dovuto all'arresto del deflusso idrico lungo il canale A.

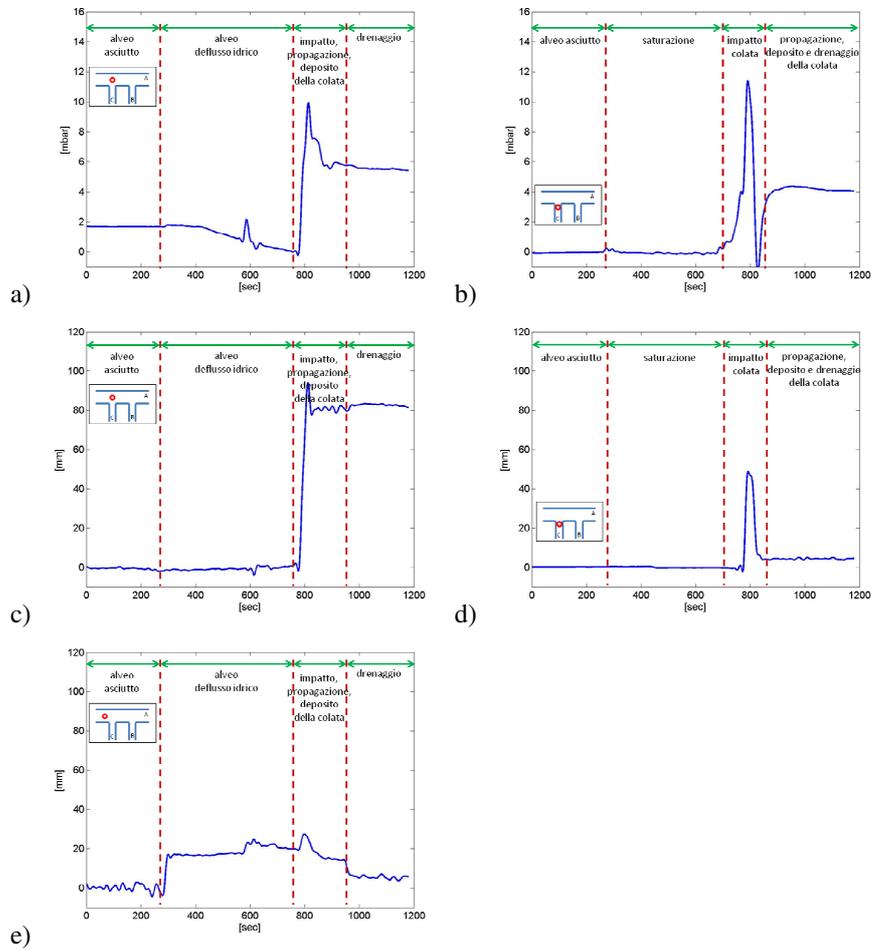


Figura 6.106 Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta C nel canale principale durante la prova 18: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta C; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta C; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.

6.20 Esperimento 19 ($\alpha=90^\circ$, $\beta=15^\circ$, C->B)

L'esperimento no.19 è caratterizzato dai parametri macroscopici e dai parametri idraulici di controllo riportati in Tabella 6.XX. L'inclinazione della canaletta A è stata fissata a 5° e quelle delle canalette B e C a 15° . Lo strato di materiale posto lungo le canalette laterali è di 10 cm circa e la portata di saturazione degli ammassi è pari a 0.78 l/s, valore strettamente dipendente dalla tipologia di materiale utilizzato e dallo spessore dell'ammasso.

Tabella 6.XX Parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e parametri idraulici adottati nell'esperimento 19: numero d'ordine della prova, portata fluente nella canaletta principale, angolo di confluenza delle canalette laterali e istanti di innesco delle colate e portata di innesco nelle canalette laterali.

N. exp.	canaletta A	canaletta B			canaletta C		
	Portata [l/s]	Angolo di confluenza	t_0 innesco [s]	Portata di innesco [l/s]	Angolo di confluenza	t_0 innesco [s]	Portata di innesco [l/s]
19	4.80	90°	204	3.03	90°	0	2.90

Durante l'esperimento sono stati generate due differenti fenomeni di colata, il primo lungo il canale C e il secondo lungo il canale B.

In Figura 6.107 si riporta una immagine acquisita in fase finale dell'esperimento condizione drenate del deposito lungo il canale A. Mentre in Figura 6.108 e in Figura 6.109 si riportano rispettivamente le immagini dei depositi osservati a fine esperimento lungo i canali B e C (Figura 6.108a e Figura 6.109a) e a valle dei canali B e C (Figura 6.108b e Figura 6.109b).



Figura 6.107 Vista generale dei depositi lungo la canaletta A in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.19 ad esperimento concluso.



Figura 6.108 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.19 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta B; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta B.



Figura 6.109 Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.19 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta C; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta C.

Da queste immagini è possibile riconoscere l'interferenza tra i depositi, cioè quella striscia di sedimenti che si colloca tra gli sbocchi e che ha ampiezza di circa 25 cm. In questo caso si colloca in posizione centrale rispetto all'asse trasversale del canale A, quindi in posizione distaccata dalla parete dove sono collocati gli sbocchi. Inoltre si osserva un maggiore volume di deposito a valle del canale B rispetto a quello osservato a valle del canale C.

La ricostruzione del deposito effettuata grazie ai dati acquisiti con il micrometro di precisione viene riportata in Figura 6.110. Anche da questa immagine come in Figura 6.107 è possibile individuare un deposito di interferenza con posizione centrale rispetto all'asse trasversale del canale A.

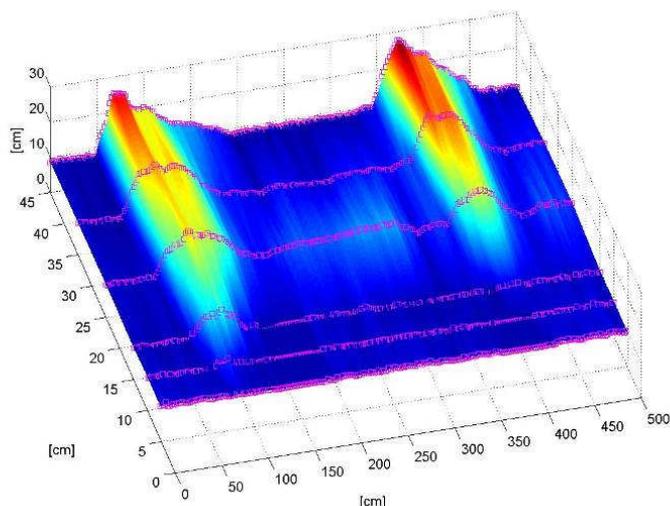


Figura 6.110 Ricostruzione tridimensionale dei depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.19.

In Figura 6.111 e in Figura 6.112 si riportano gli andamenti della variazione della pressione e del livello nel tempo entrambi registrati in funzione della propagazione del fenomeno di colata.

La Figura 6.111a e la Figura 6.111c illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 19 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta A, in prossimità dello sbocco della canaletta B. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 50 cm.

L'andamento del grafico in Figura 6.111a indica che, a circa 250 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, tale fenomeno è verosimilmente attribuibile all'erogazione di portata nel canale principale (A). L'inizio del deposito dei sedimenti convogliati dalla colata detritica, generata lungo la canaletta B, si realizza attorno ai 750 s. Nell'intervallo di tempo compreso tra i 750 s e i 1030 s, si registra un notevole innalzamento dei valori acquisiti sia dalla cella di pressione che dalla sonda di livello (Figura 6.111a e Figura 6.111c). In particolare, la cella di pressione (Figura 6.111a) evidenzia, l'impatto dinamico della colata detritica sul fondo durante la fase di progressivo accrescimento del deposito individuato da un picco di pressione registrato a 780 s dall'inizio di acquisizione dei dati. Infine nell'intervallo compreso tra i 1030 s e la fine dell'esperimento si osserva attraverso l'abbassamento d'andamento registrato sia dalla cella di pressione che dal sensore di livello la fase di drenaggio dell'ammasso.

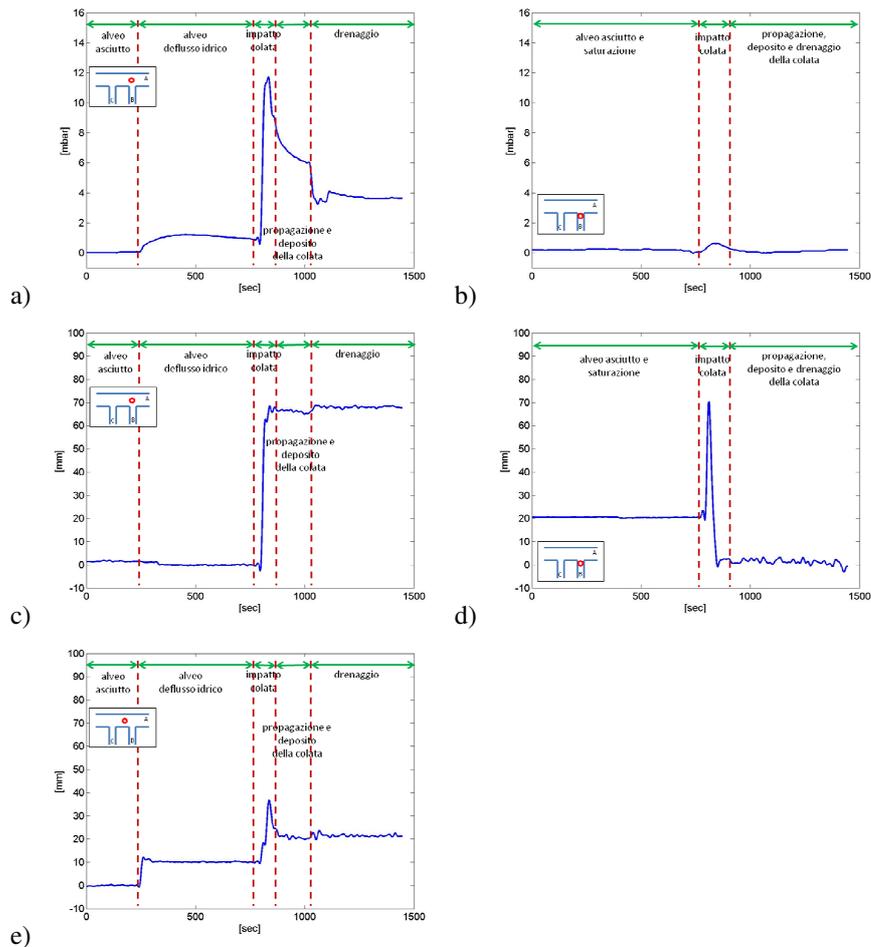


Figura 6.111 Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta B nel canale principale durante la prova 19: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta B; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta B; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.

La Figura 6.111b e la Figura 6.111d illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 19 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta B, in prossimità dello sbocco. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 20 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.111b indica che, a circa 750 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un innalzamento di pressione, verosimilmente attribuibile all'innesco e alla

propagazione della colata. In Figura 6.111d si registra che la propagazione della colata viene registrata nella sezione di misura nell'arco temporale compreso tra 750 s e 1400 s, inoltre si evidenzia che il colmo della colata nella sezione viene raggiunto a 800 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati.

La Figura 6.111e illustra l'andamento della sonda di livello posta lungo il canale A a 75 cm circa a valle dello sbocco con la canaletta B. Si registra anche in questo caso che a 250 s circa dall'inizio dell'acquisizione dati un aumento di livello conseguente all'inizio del deflusso idrico lungo il canale A, e successivamente un aumento di livello, anche se di entità modesta, nell'intervallo temporale compreso tra 750 s e 1030 s al trasporto solido conseguente all'erosione del materiale depositato più a monte. Anche in questo caso per tempi superiori ai 1030 s si registra un abbassamento di livello dovuto all'arresto del deflusso idrico lungo il canale A.

La Figura 6.112a e la Figura 6.112c illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta A, in prossimità dello sbocco della canaletta C. Analogamente a quanto descritto per la canaletta B, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 50 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.112a indica che, a circa 250 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra l'inizio del deflusso idrico nel canale A e al contributo della portata di saturazione che filtra attraverso l'ammasso detritico inizialmente collocato nella canaletta C; fenomeno che viene rilevato dalla sonda di livello accoppiata con un leggero andamento ondulatorio (vedi Figura 6.112c). L'inizio del deposito dei sedimenti convogliati dalla colata detritica generata lungo la canaletta C si realizza attorno ai 600 s. Nell'intervallo di tempo tra 600 s e i 900s si osserva un notevole innalzamento dei valori acquisiti sia dalla cella di pressione che dalla sonda di livello, fenomeno conseguente al passaggio dell'onda di piena e al depositarsi del materiale al fondo. In particolare la cella di pressione identifica la fase di deposizione del materiale come composta da una fase, identificabile dall'andamento del grafico in Figura 4 attraverso il picco realizzato a 700 s. Infine nell'intervallo compreso tra i 900 s e la fine della prova, la pressione al fondo e il livello della superficie subiscono un abbassamento verosimilmente attribuibile al drenaggio dell'ammasso.

La Figura 6.612b e la Figura 6.612d illustrano gli andamenti dei dati acquisiti nel corso dell'esperimento 19 dalla sonda di livello e dalla cella di pressione localizzate in uno stesso punto della canaletta C, in prossimità dello sbocco. In particolare, la cella di pressione è posta in corrispondenza del fondo del canale mentre il sensore di livello ad ultrasuoni è localizzato a una quota superiore di circa 20 cm. L'andamento del grafico in Figura 6.612b indica che, a circa 250 s dall'inizio dell'acquisizione dei dati si registra un aumento di pressione, verosimilmente attribuibile all'erogazione della portata di saturazione. Mentre in Figura 6.612d si registra che la propagazione della colata viene registrata nella sezione di misura nell'arco temporale compreso tra 620 s e 750 s. Il passaggio del colmo della colata viene rilevato sia dalla cella di pressione che dal sensore di livello a 650 s dall'inizio di acquisizione dati. Infine nell'intervallo compreso tra i 750 s e la fine della prova, la pressione al fondo subisce un abbassamento nell'andamento registrato verosimilmente attribuibile all'arresto della portata erogata lungo il canale C.

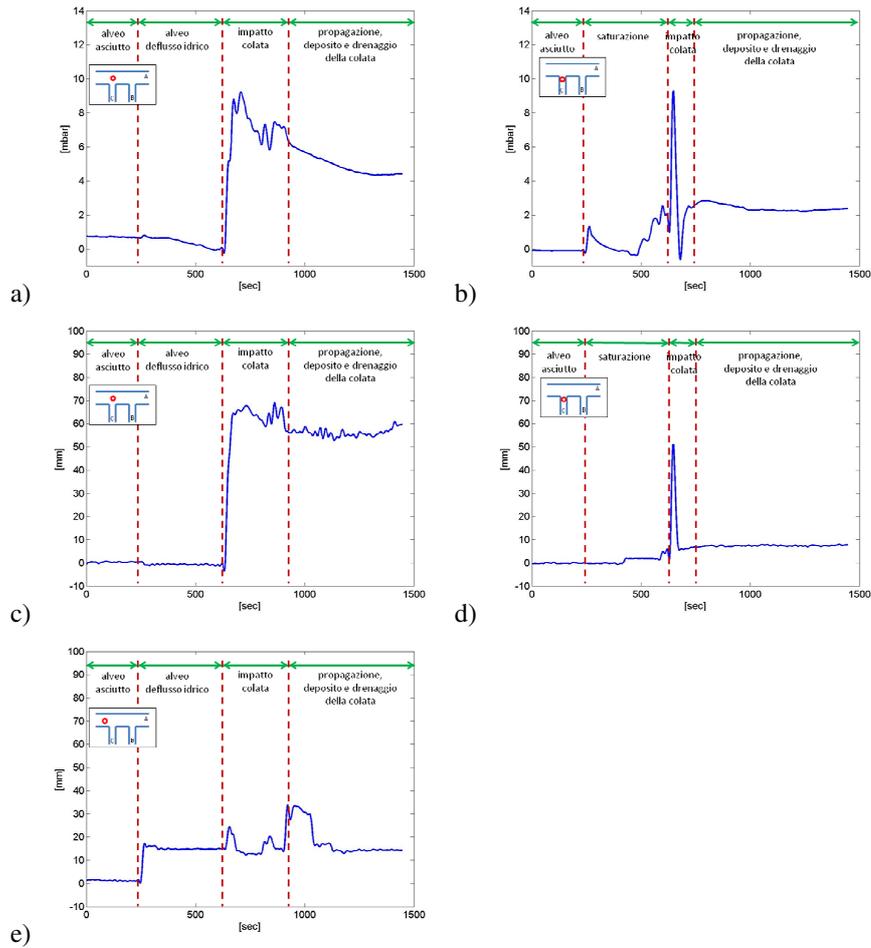


Figura 6.112 Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta C nel canale principale durante la prova 19: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta C; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta C; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.

La Figura 6.112e illustra l'andamento della sonda di livello posta lungo il canale A a 75 cm circa a valle dello sbocco con la canaletta C. Si registra anche in questo caso, a 250 s circa dall'inizio dell'acquisizione dati, un aumento di livello conseguente all'inizio del deflusso idrico lungo il canale A, e successivamente un aumento di livello, anche se di entità modesta, nell'intervallo temporale compreso tra 600 s e 900 s al trasporto solido conseguente all'erosione del materiale depositato più a monte. Anche in

questo caso per tempi superiore ai 1030 s si registra un abbassamento di livello dovuto all'arresto del deflusso idrico lungo il canale A.

7. ANALISI DELLE EVIDENZE SPERIMENTALI

7.1 Generalità

Le evidenze sperimentali già presentate al capitolo 6, vengono qui di seguito discusse ed elaborate al fine di verificare l'influenza che parametri quali: l'angolo di confluenza, la pendenza dei canali B e C e la diversa tempistica di innesco esercitano sulla propagazione e sull'arresto delle colate detritiche in condizione di confluenze multiple.

Le analisi qui presentate vengono suddivise in due diverse tipologie: analisi sulla propagazione della colata e analisi sul deposito della colata.

Per quanto concerne l'analisi sulla propagazione del fenomeno di colata, si sono effettuati diversi confronti utilizzando i dati acquisiti dai trasduttori di pressione e dalle sonde di livello acustiche durante lo svolgimento degli esperimenti condotti.

Mentre per quanto riguarda le analisi sul deposito di colata, la geometria di quest'ultimo è stata investigata attraverso il confronto dei profili rilevati in differenti sezioni, considerando sia sezioni longitudinali che sezioni trasversali del canale A. Ulteriori analisi sui depositi sono state condotte attraverso il calcolo di parametri caratteristici del deposito della colata quali: volume, posizione del centro di massa, fattore di forma dei singoli depositi allo sbocco dei canali B e C.

Il presente capitolo viene diviso in due paragrafi principali, il paragrafo 7.2 relativo alle analisi condotte sulla propagazione e il paragrafo 7.3 relativo alle analisi condotte sulla geometria dei depositi.

Più precisamente il paragrafo 7.3 relativo all'analisi sui depositi è stato suddiviso al suo interno in differenti sottoparagrafi. In particolare, al paragrafo 7.3.1 vengono descritti e determinati i parametri caratteristici del deposito. Successivamente al paragrafo 7.3.2 vengono effettuate le analisi sui profili longitudinali e trasversali della colata. Mentre al paragrafo 7.3.3 vengono presentate ulteriori analisi svolte facendo dei confronti tra i vari esperimenti considerando i parametri caratteristici del deposito. Infine al paragrafo 7.3.4 si descrive una particolare analisi condotta per esperimenti caratterizzati dalla stessa condizione di innesco e dalla stessa pendenza. Per questa ultima tipologia di analisi, al fine di meglio comprendere il fenomeno di deposito, si valutano in maniera dettagliata non soltanto i parametri relativi all'intero deposito ma anche quelli relativi al singolo deposito sviluppato in prossimità dello sbocco del canale B di monte.

7.2 Analisi sui profili di propagazione

Le analisi qui presentate sono volte alla comprensione del fenomeno di propagazione delle colate. In particolare, si studiano i segnali acquisiti durante lo

svolgimento dell'esperimento dai trasduttori di pressione e dai sensori acustici di livello.

Si effettuano confronti tra i differenti andamenti per investigare l'influenza esercitata dalla variazione dei seguenti parametri relativi ai canali B e C: pendenza, angolo di confluenza e tempistica di innesco sul fenomeno di propagazione della colata.

Per quanto riguarda le analisi condotte effettuando la variazione della pendenza del canale B e del canale C, si sono confrontati (vedere Figura 7.1 e Figura 7.2) gli andamenti acquisiti dai trasduttori di pressione e dai sensori di livello durante lo svolgimento di due esperimenti caratterizzati da uguale angolo di confluenza (60°) e da uguale tempistica di innesco (fenomeno innescato prima a monte e poi a valle) ma da differenti pendenze rispettivamente pari a 17° (EXP1) e 15° (EXP11). In particolare, in Figura 7.1a-c si riportano gli andamenti relativi alla sezione posta lungo il canale A in prossimità dello sbocco del canale C rispettivamente per il trasduttore di pressione e il sensore di livello, mentre in Figura 7.1b-d si riportano gli andamenti relativi alla sezione posta lungo il canale C in prossimità dello sbocco rispettivamente per il trasduttore di pressione e il sensore di livello, mentre in Figura 7.1e si riporta l'andamento relativo alla sezione posta lungo il canale A a circa 75cm dalla sezione di sbocco del canale C.

Dal confronto delle Figure 7.1a-b-c-d si evince che, in generale, all'aumentare della pendenza aumentano i valori acquisiti nel tempo sia relativi al trasduttore di pressione che al sensore di livello. Mentre per quanto concerne la Figura 7.1e si evidenzia un andamento con valori di picco maggiori per esperimenti con pendenza minore (15°). Ciò conferma che il trasporto verso valle è maggiore per pendenze minori.

Per valutare l'influenza della variazione dell'angolo di confluenza sul fenomeno di propagazione si sono effettuati alcuni confronti tra esperimenti con medesime configurazioni di pendenza e di tempistica di innesco. In Figura 7.2 si riportano nello stesso grafico gli andamenti rilevati dal trasduttore di pressione e dal sensore di livello per esperimenti con pendenza dei canali B e C pari a 17° , condizione di innesco con fenomeno prima a monte e poi a valle e angolo di confluenza rispettivamente 60° (EXP1), 50° (EXP4), 90° (EXP16).

In particolare, in Figura 7.2a-c si riportano gli andamenti acquisiti nella sezione di misura posta lungo il canale A allo sbocco del canale C rispettivamente dal trasduttore di pressione e dal sensore di livello, mentre in Figura 7.2b-d si riportano gli andamenti acquisiti nella sezione di misura posta lungo il canale C in prossimità dello sbocco nel canale A rispettivamente dal trasduttore di pressione e dal sensore di livello, infine in Figura 7.2e si riporta l'andamento acquisito dal sensore di livello nella sezione posta lungo il canale A a circa 75cm a valle dello sbocco del canale C.

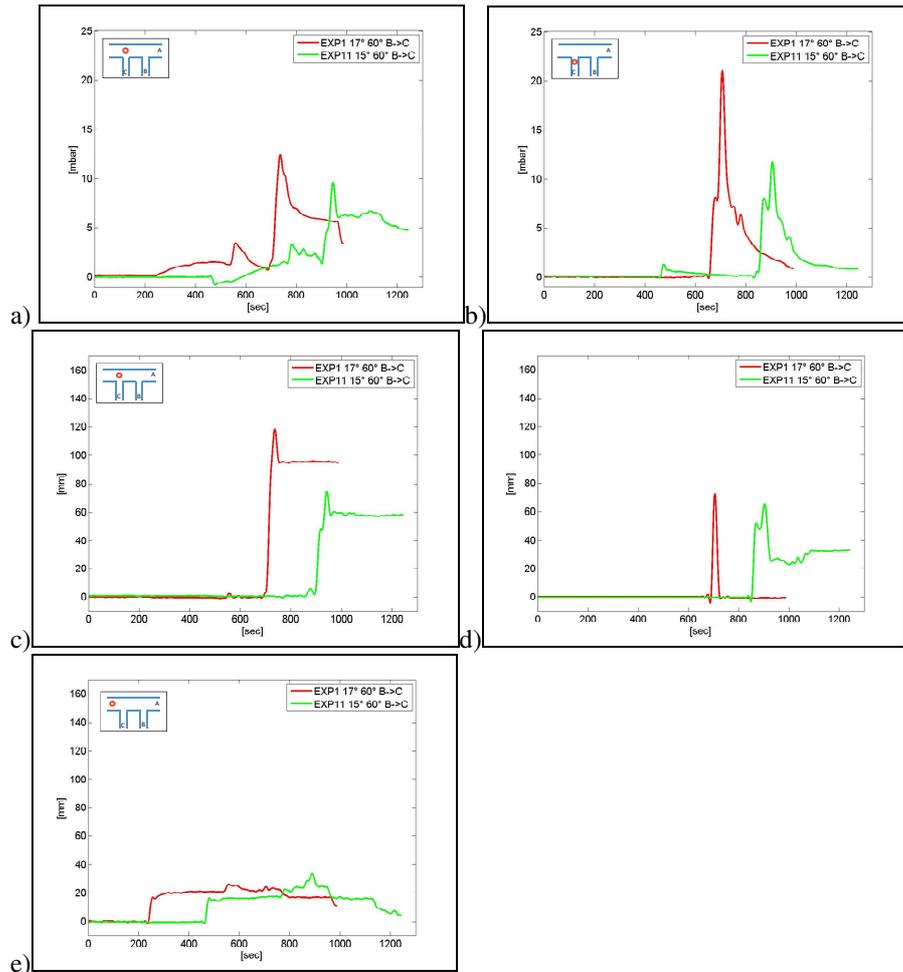


Figura 7.1 Confronto dei segnali acquisiti per esperimenti caratterizzati da angolo di confluenza 60°, tempistica di innesco monte-valle e pendenze 17° (EXP1) e 15° (EXP11) da: trasduttore di pressione posto lungo il canale A in prossimità dello sbocco del canale C; b) trasduttore di pressione posto lungo il canale C in prossimità dello sbocco nel canale A; c) sensore di livello posto lungo il canale A in prossimità dello sbocco del canale del canale C; d) sensore di livello posto lungo il canale C in prossimità dello sbocco nel canale A; e) sensore di livello posto lungo il canale A a 75cm circa dalla sezione di sbocco del canale C.

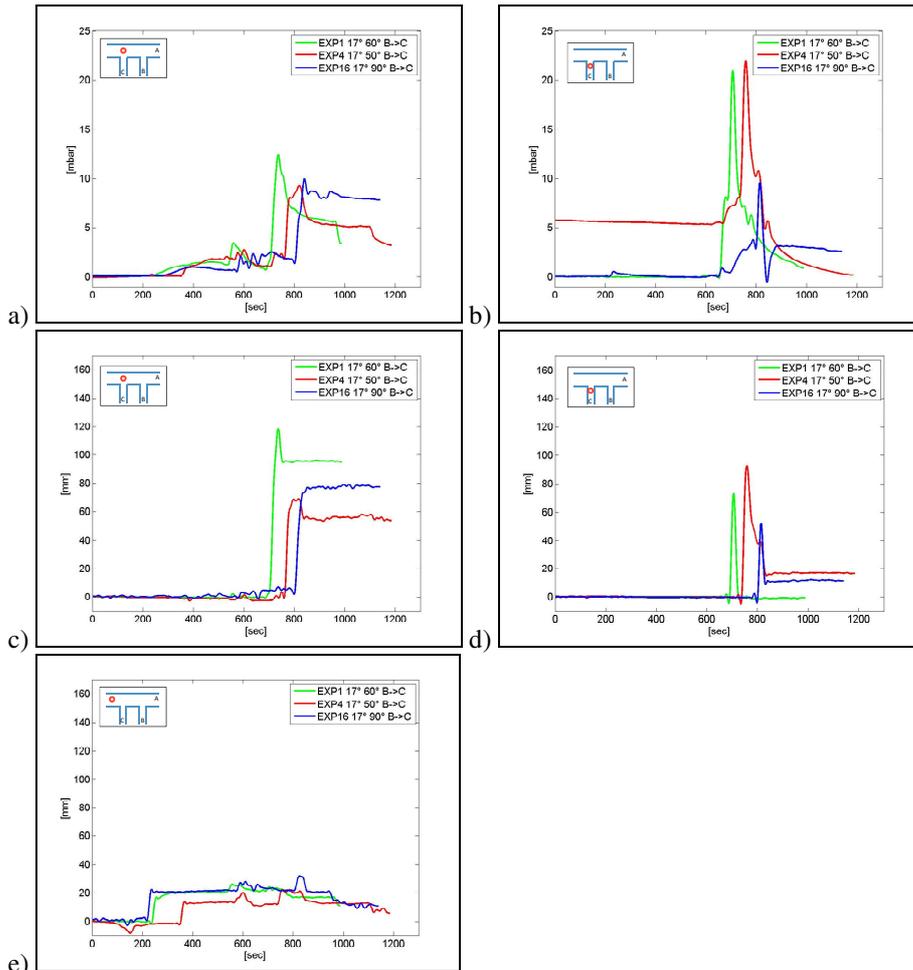


Figura 7.2 Confronto dei segnali acquisiti per esperimenti caratterizzati da pendenza dei canali B e C 17° , condizione di innesco monte-valle, angolo di confluenza rispettivamente 60° (EXP1), 50° (EXP4), 90° (EXP16) da: a) trasduttore di pressione posto lungo il canale A in prossimità dello sbocco del canale C; b) trasduttore di pressione posto lungo il canale C in prossimità dello sbocco nel canale A; c) sensore di livello posto lungo il canale A in prossimità dello sbocco del canale C; d) sensore di livello posto lungo il canale C in prossimità dello sbocco nel canale A; e) sensore di livello posto lungo il canale A a 75cm circa dalla sezione di sbocco del canale C.

Dall'analisi delle Figure 7.2a-c-e relative agli andamenti registrati dal trasduttore di pressione e dai sensori di livello posti lungo il canale A si evince che all'aumentare dell'angolo di confluenza da 50° a 60° per ugual condizioni di pendenza e tempistica di

innesco aumentano sia le pressioni che i livelli acquisiti. Tale evidenza sperimentale spiega che per angoli di confluenza minori il deposito si sposta maggiormente verso valle. Mentre per quanto concerne gli esperimenti condotti con l'angolo di confluenza 90° nelle sezioni di misura poste lungo il canale A si osserva che per la sezione davanti lo sbocco i livelli rilevati dal trasduttore di pressione e dal sensore di livello hanno un andamento mediano rispetto alle configurazioni sperimentali ottenute per angolo di confluenza a 50° e 60° . Tale comportamento verosimilmente è attribuibile alla maggiore distribuzione del deposito della colata lungo la sezione trasversale del canale A.

Inoltre dalla Figura 7.2a e dalla Figura 7.2c si nota, per esperimenti con angolo di confluenza 50° e 60° , un abbassamento dell'andamento per istanti di tempo successivi alla fase di impatto della colata. Tale comportamento indica che il materiale prima depositato viene successivamente eroso, mentre per l'esperimento caratterizzato da angolo di confluenza 90° tale erosione è impercettibile per la sezione di misura adottata. Tale comportamento è un'altra volta attribuibile alla maggiore distribuzione del deposito di colata lungo la sezione trasversale del canale A.

Infine sono state svolte analisi volte a valutare l'influenza della condizione di innesco, pertanto sono considerati esperimenti caratterizzati da uguale pendenza dei canali laterali (17°) da uguale angolo di confluenza (50°) ma con differenti condizioni di innesco: prima a valle e poi a monte (EXP4), prima a monte e poi a valle (EXP5) e contemporaneo (EXP6). Tale confronto è stato fatto per il rilievo acquisito per mezzo dei sensori di livello in diverse sezioni di misura rispettivamente: sezione lungo il canale A in prossimità dello sbocco del canale C (Figura 7.3a), sezione lungo il canale A a circa 75 cm più a valle dello sbocco del canale C (Figura 7.3b) e sezione lungo il canale C in prossimità dello sbocco nel canale A (Figura 7.3c).

Dall'analisi di Figura 7.3a-b-c si evidenzia che per lo stesso angolo di confluenza (50°) al variare della tempistica di innesco si rilevano differenze pressoché nulle per tutte le sonde poste lungo il canale A, mentre variazioni rilevanti si evidenziano dall'analisi dei dati acquisiti dalle sonde poste lungo il canale laterale C. In particolare, in Figura 7.3c si nota che per condizioni di innesco monte-valle e valle-monte il materiale viene interamente trasportato a valle rilevando livelli di sedimento uguali e di modeste entità, mentre per l'esperimento con innesco contemporaneo si evidenzia un deposito nella zona in prossimità dello sbocco.

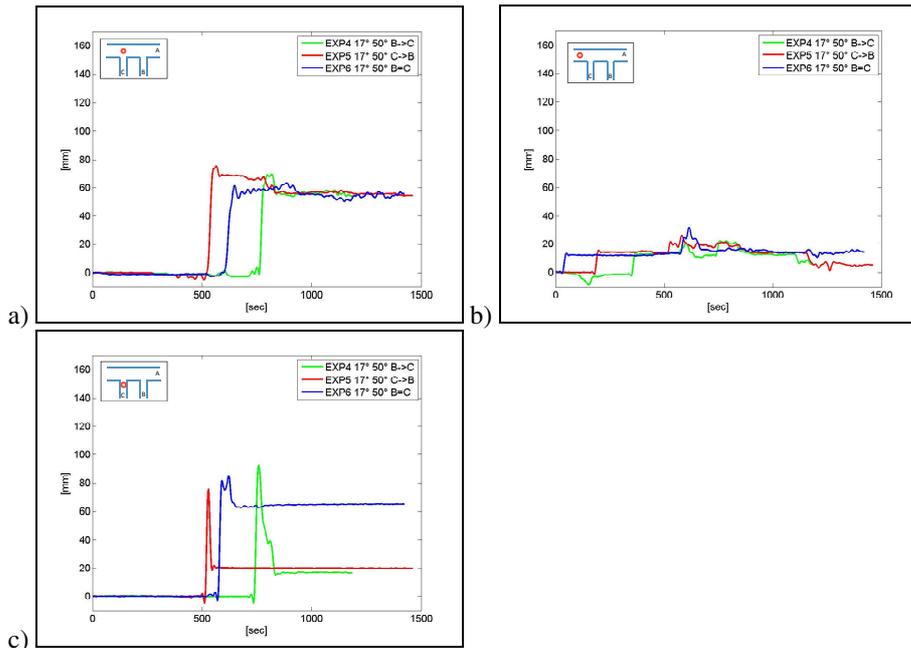


Figura 7.3 Confronto dei profili relativi a esperimenti con pendenza del canale B e del canale C 17° , angolo di confluenza 50° al variare della condizione di innesco rilevati da sensori di livello posti: a) lungo il canale A nella sezione in prossimità dello sbocco del canale C; b) lungo il canale A nella a 75 cm a valle dalla sezione di sbocco del canale C; c) lungo il canale C in prossimità dello sbocco nel canale A.

7.3 Analisi condotte sui fenomeni di deposito

7.3.1 Determinazione dei parametri caratteristici dei depositi

I parametri caratteristici del deposito della colata vengono determinati in modo da consentire un confronto sistematico tra i vari esperimenti condotti. Essi sono:

- volume del deposito lungo il canale A (V_{dep});
- posizionamento del centro di massa del deposito complessivo (X_G, Y_G, Z_G);
- posizionamento del centro di massa del deposito allo sbocco della canaletta B (X_{GB}, Y_{GB}, Z_{GB});
- fattore di forma del singolo deposito, cioè relativo al deposito allo sbocco del canale B e del canale C (F_B e F_C).

In Figura 7.4 si riportano alcuni esempi di vista dall'alto relativi al rilievo del deposito acquisito a conclusione di ogni singolo esperimento. All'interno delle immagini in Figura 7.4 vengono indicate come Y_{Bmax} e Y_{Cmax} l'estensione maggiore del

deposito lungo l'asse trasversale del canale rispettivamente per il deposito a valle del canale B e del deposito a valle del canale C. Inoltre con X_{BM} e X_{CM} si indicano rispettivamente le distanze calcolate tra l'asse intermedio (corrispondente alla progressiva 210 cm) e l'inizio del deposito allo sbocco del canale B e l'inizio del deposito allo sbocco del canale C, mentre con X_{BV} e X_{CV} si indicano le distanze calcolate rispetto l'asse intermedio e la fine del deposito allo sbocco del canale B e la fine del deposito allo sbocco del canale C. Inoltre in Figura 7.4 viene indicato per ogni esperimento il posizionamento del centro di massa del deposito tramite il simbolo di asterisco rosso.

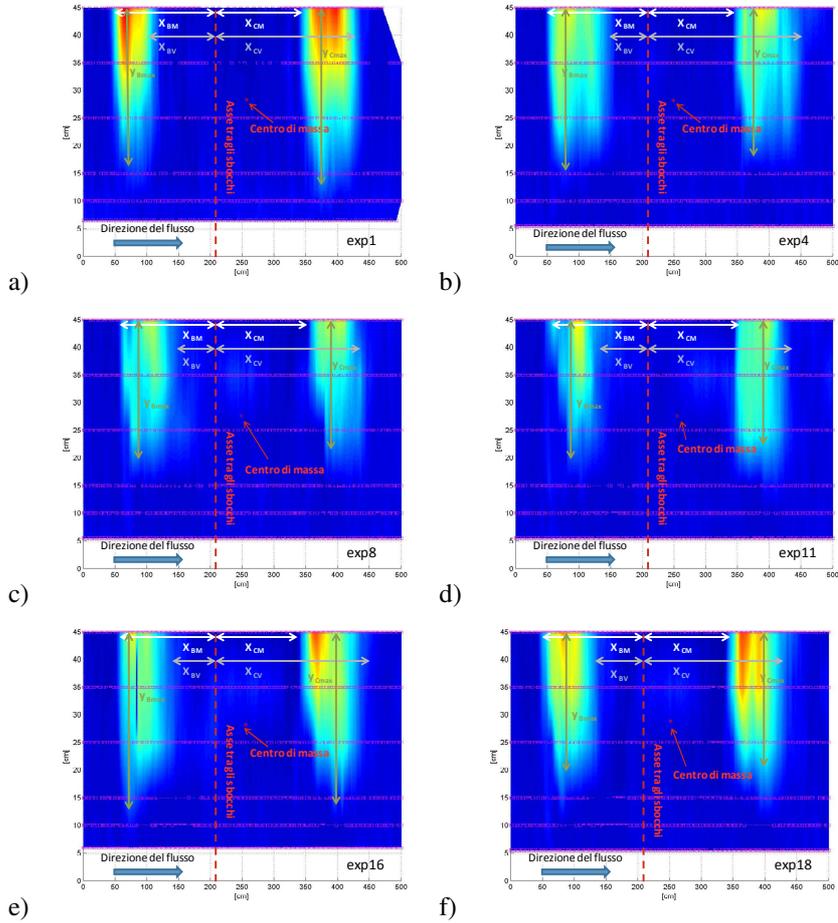


Figura 7.4

Rappresentazioni in pianta del rilievo del deposito acquisito a fine esperimento, dove sono indicate le distanze tra l'asse mediano degli sbocchi e l'inizio e la fine del deposito di monte (x_{BM} e x_{BV}), le distanze tra l'asse mediano degli sbocchi e l'inizio e la fine del deposito di valle (x_{CM} e x_{CV}), la massima estensione trasversale del deposito di monte (y_{Bmax}), la massima estensione trasversale del deposito di valle (y_{Cmax}), e la posizione del centro di massa.

Per quanto concerne il fattore di forma dei singoli depositi realizzati agli sbocchi del canale B e del canale C, esso è stato determinato calcolando il rapporto tra le seguenti dimensioni: estensione maggiore del deposito lungo l'asse trasversale del canale A ed estensione maggiore del deposito lungo l'asse longitudinale dello stesso canale A. In riferimento alle grandezze indicate in Figura 7.4, il fattore di forma dei singoli depositi si calcola come segue:

per la canaletta di monte (B): $F_M = Y_{BMAX} / (X_{BM} - X_{BV})$

per la canaletta di valle (C): $F_V = Y_{CMAX} / (X_{CM} - X_{CV})$

In Tabella 7.I vengono riportati i valori relativi ai differenti parametri calcolati per ogni singolo esperimento.

Tabella 7.I Valori di differenti parametri calcolati per ogni esperimento: volume del deposito lungo il canale A (V_{dep}); posizione del centro di massa del deposito complessivo (X_G, Y_G, Z_G); posizione del centro di massa del deposito allo sbocco della canaletta B (X_{GB}, Y_{GB}, Z_{GB}); fattore di forma del singolo deposito, cioè relativo al deposito allo sbocco del canale B e del canale C (F_B e F_C)

EXP n°	V_{dep} [cm ³]	X_G [cm]	Y_G [cm]	Z_G [cm]	X_{GB} [cm]	Y_{GB} [cm]	Z_{GB} [cm]	F_B [-]	F_C [-]
1	132837.2	257.23	28.35	5.24	92.4	28.91	5.08	0.39	0.36
2	103424.6	229.57	28.22	4.43	-	-	-	0.31	0.31
3	97562.6	247.26	27.6	3.32	-	-	-	0.29	0.23
4	101705.2	248.68	28.22	3.82	101	28.85	4.18	0.31	0.24
5	98036.8	247.63	28.24	3.9	-	-	-	0.34	0.31
6	96802.6	238.56	27.56	3.53	-	-	-	0.35	0.34
7	101374.4	232.94	26.43	2.63	-	-	-	-	-
8	90283.4	249.03	27.6	3.23	106.87	28.25	3.45	0.31	0.28
9	85255.2	235.65	26.5	2.92	-	-	-	0.30	0.37
10	105948.6	251.28	28.28	3.6	-	-	-	0.26	0.25
11	90983.6	255.02	27.64	3.23	103.97	28.37	3.23	0.40	0.42
12	94488.6	234.74	28.01	3.53	-	-	-	0.31	0.37
13	86464.6	243.51	27.58	2.99	-	-	-	0.30	0.28
14	85878.8	240.05	27.43	3.2	-	-	-	0.31	0.36
15	106990.8	254.4	26.82	3.47	-	-	-	0.47	0.39
16	101054.2	255.26	28.25	4.03	100.89	23.12	1.31	0.35	0.25
17	99373.8	249.48	27.18	3.42	104.42	28.26	3.84	0.38	0.34
18	105433.2	251.61	28.85	4.54	98.94	29.29	4.54	0.33	0.32
19	105613.46	248.7	27.85	3.78	-	-	-	0.39	0.39

7.3.2 Analisi sui depositi basate sui profili di rilievo longitudinali

Per quanto concerne le analisi sui depositi, inizialmente si sono condotti studi basandosi sull'osservazione dei profili longitudinali di deposito rilevati lungo il canale A in condizione drenate a fine di ogni esperimento. In particolare si sono analizzate le differenze e le analogie nei profili rilevati in base alla variazione dell'angolo di confluenza, della pendenza delle canalette laterali e della tempistica di innesco.

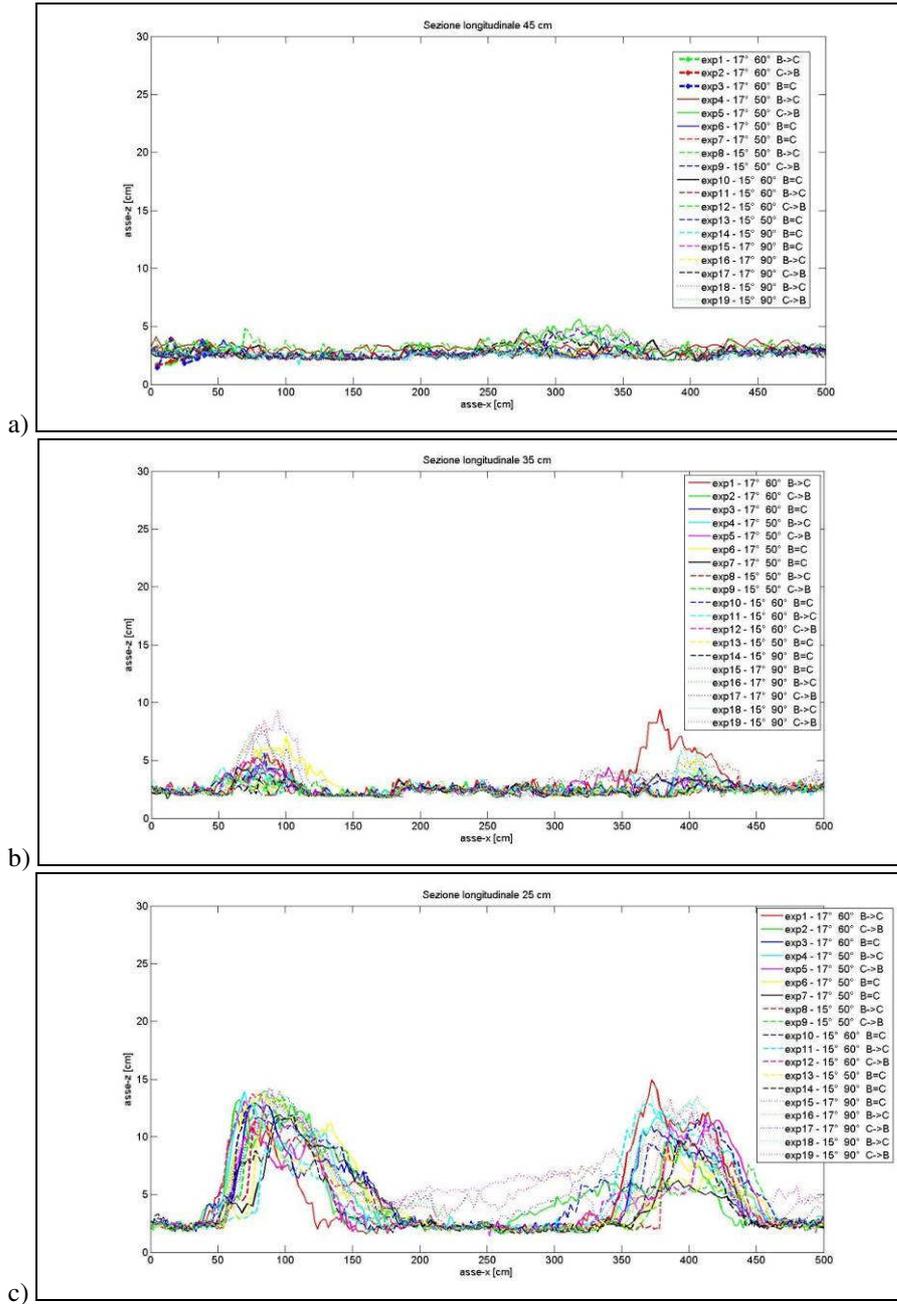
In Figura 7.5 si riportano gli andamenti dei cinque profili longitudinali rilevati rispettivamente dalla sezione di misura più distante dalla parete in cui sono collocati gli sbocchi delle due canalette laterali a quella più vicina (sezione a 45cm, sezione a 35cm, sezione a 25cm, sezione a 15cm e sezione a 5 cm).

Da Figura 7.5a si osserva che i profili longitudinali hanno pressoché lo stesso andamento con livelli di sedimentazione di circa due centimetri. Anche se viene riscontrato per alcuni esperimenti un livello di deposito leggermente maggiore (1cm circa) in prossimità dello sbocco del canale C, in particolare per esperimenti condotti con tempistica di innesto con fenomeni prima a monte e poi a valle.

Mentre dall'analisi dei profili di deposito acquisiti lungo la sezione a 35 cm dalla parete in cui sono collocati gli sbocchi (Figura 7.5b), è possibile distinguere già in maniera netta le collocazioni delle due differenti confluenze. Inoltre in Figura 7.5b si evidenzia anche una zona di deposito tra le due confluenze (deposito di interferenza) che ha inizio alla sezione trasversale del canale A posta a 175 cm circa in direzione del flusso.

Le interazioni tra le confluenze osservate per i profili acquisiti lungo la sezione longitudinale del canale A posta a 25 cm dalla parete opposta agli sbocchi (Figura 7.5c) sono decisamente maggiori rispetto a quelli relativi alle sezioni analizzate precedentemente. Inoltre si evidenzia che gli esperimenti per cui si osserva l'interazione maggiore sono quelli con angolo di confluenza maggiore (90°) e una tempistica di innesco caratterizzata da innesco contemporaneo e da innesco valle - monte.

Infine osservando i rilievi di deposito acquisiti lungo la sezione longitudinale del canale A per le sezioni a 15 e a 5 cm dalla parete in cui sono collocati gli sbocchi, si osserva come nel caso precedente che le interazioni maggiori si rilevano per angoli di confluenza maggiori e tempistica di innesco o contemporanea o valle - monte. Inoltre, appare opportuno indicare che l'interazione tra i depositi diminuisce proseguendo dalla sezione a 15 cm dallo sbocco a quella a 5 cm dallo sbocco. Tale osservazione verrà in seguito confermata dall'analisi condotta sui rilievi di deposito ottenuti per le sezione trasversali del canale A (paragrafo 7.3.3).



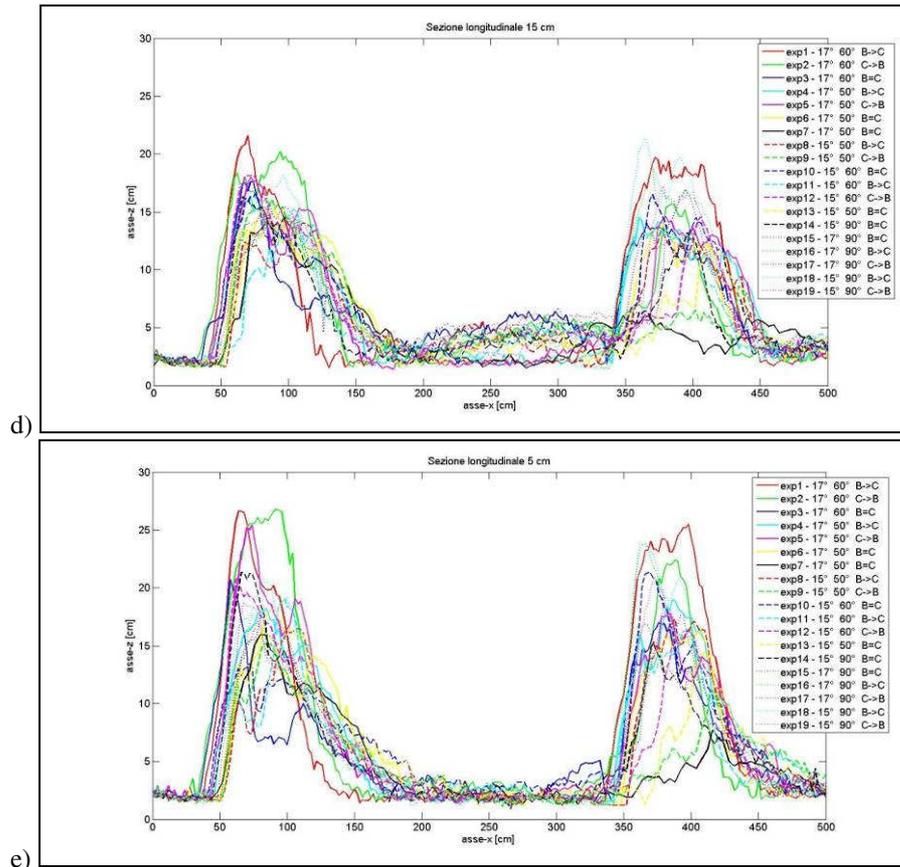


Figura 7.5 Profili longitudinali del deposito di colata rilevati a fine esperimenti per l'intero set di prove condotte per le seguenti sezioni indicate in base alla distanza dalla parete in cui sono collocate le confluenze: a) sezione a 45 cm; b) sezione a 35 cm; c) sezione a 25 cm; d) sezione a 15 cm; e) sezione a 5 cm.

Successivamente si è passati all'analisi qualitativa condotta sulle osservazioni dei vari profili di deposito ottenuti ad una analisi maggiormente sistematica volta ad indagare l'influenza della variazione dell'angolo di confluenza, della pendenza del canale B e del canale C e della tempistica di innesco.

Per effettuare un'analisi circa l'influenza sulle forme dei depositi esercitata dalla variazione dell'angolo di confluenza, si sono analizzati i rilievi longitudinali del deposito lungo il canale A acquisiti nella sezione centrale (sezione a 25 cm dagli sbocchi) per uguale condizione di innesco e ugual pendenza ma al variare dell'angolo di confluenza. In particolare, in Figura 7.6 si riportano i grafici ottenuti al variare dell'angolo di confluenza ma mantenendo costante la pendenza delle canalette laterali a 17° e la condizione di innesco rispettivamente: prima a monte e poi a valle (Figura 7.6a), prima a valle e poi a monte (Figura 7.6b, c) e contemporaneo (Figura 7.6c).

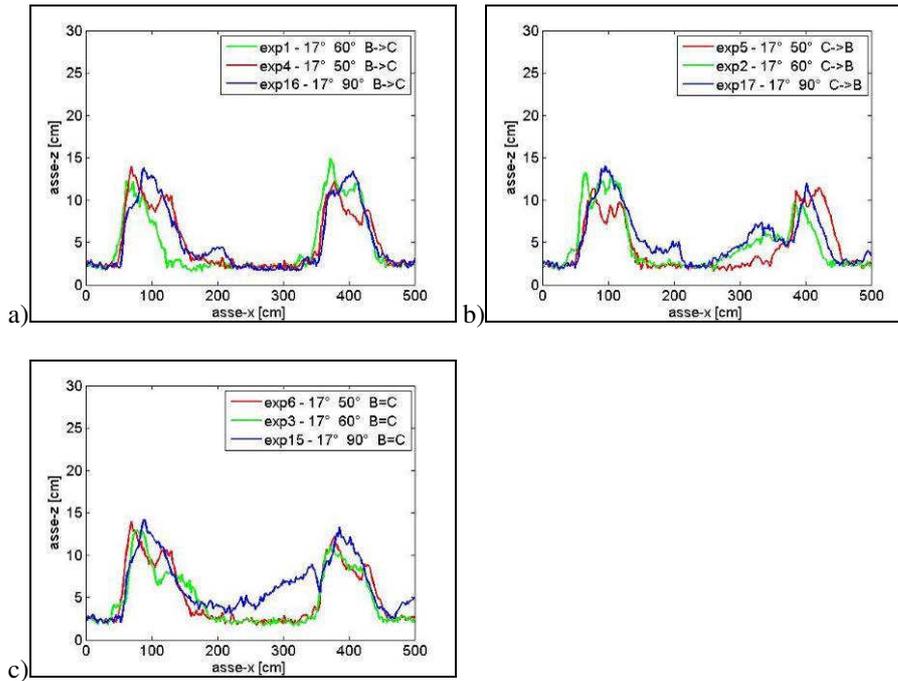


Figura 7.6 Confronto tra profili longitudinali del deposito nel canale A acquisiti lungo la sezione a 25 cm al variare dell'angolo di confluenza dei canali B e C con pendenza delle canalette laterali pari a 17° e condizione di innesco rispettivamente: a) monte - valle; b) valle - monte; c) contemporaneo.

Dai grafici in Figura 7.6 si evince che, come era logico prevedere, il trasporto solido verso valle è maggiore per l'angolo di confluenza minore (50°). Inoltre si evince che al crescere dell'angolo di confluenza cresce il deposito di sedimento nella zona compresa tra i due sbocchi, quindi si accrescono i fenomeni di interazione.

Per valutare l'influenza della variazione della pendenza delle canalette laterali sul deposito lungo il canale A, si è effettuata un'analisi dei profili, anch'essi rilevati lungo la sezione centrale del canale A, analizzando condizioni con medesimo angolo di confluenza e medesima tempistica di innesco. In particolare in Figura 7.7 si riportano alcuni grafici dove per ognuno varia la pendenza delle canalette laterali 15° (EXP1) e 17° (EXP11) mentre è costante sia la condizione di innesco, fenomeno prima a monte e poi a valle, sia l'angolo di confluenza, pari rispettivamente a 60° in Figura 7.7a e a 90° in Figura 7.7b.

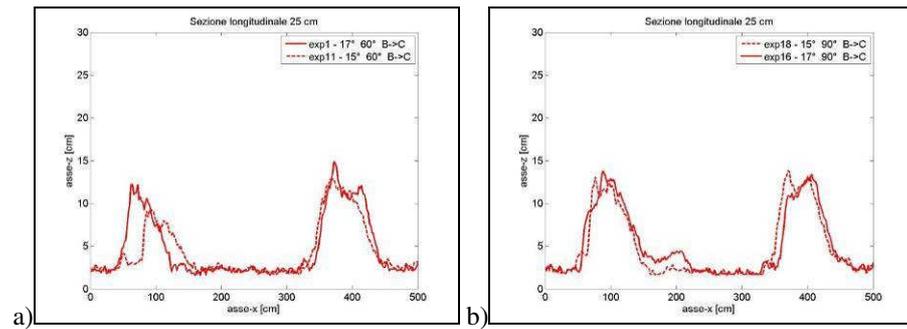


Figura 7.7 Confronto tra andamenti dei profili longitudinali del deposito nel canale A acquisiti lungo la sezione a 25 cm al variare della pendenza 17° (EXP1) 15° (exp11) con condizione di innesco costante (monte-valle) e angolo di confluenza costante rispettivamente: a) 60° ; b) 90° .

Dall'analisi della Figura 7.7 si evince che il fenomeno di trasporto verso valle aumenta al decrescere della pendenza delle canalette laterali e inoltre aumenta l'interazione tra i depositi all'aumentare della pendenza.

Infine, per valutare l'influenza della tempistica di innesco sulla forma dei depositi si sono svolte analisi sui profili al variare della tempistica di innesco ma mantenendo costante la pendenza delle canalette laterali e l'angolo di confluenza. In particolare in Figura 7.8 si riportano i grafici al variare della condizione di innesco (innesco monte - valle, innesco valle - monte e innesco contemporaneo) mantenendo costante sia la pendenza del canale (17°) che l'angolo di confluenza, rispettivamente pari a 50° (Figura 7.8a), a 60° (Figura 7.8b) e a 90° (Figura 7.8c).

Dall'analisi di Figura 7.8a-b-c si evince che l'interferenza tra i depositi è maggiore per condizione di innesco contemporaneo, minore per condizione di innesco prima a monte e poi a valle e intermedia per la condizione di innesco valle-monte. La maggior interferenza osservata, per i casi di innesco contemporaneo e di innesco prima valle e poi monte, è riconducibile al fatto che l'erosione effettuata da parte della corrente sul deposito di monte viene trattenuta nella zona compresa tra i due sbocchi dalla presenza del deposito più a valle. Mentre per la condizione di innesco prima a monte e poi a valle il deposito di monte appena formato viene eroso dalla corrente e il materiale viene trasportato a valle della zona del rilievo, solo l'erosione esercitata dalla corrente sul deposito di monte successiva alla formazione del deposito di valle verrà trattenuta e quindi verrà a formare il deposito di interferenza.

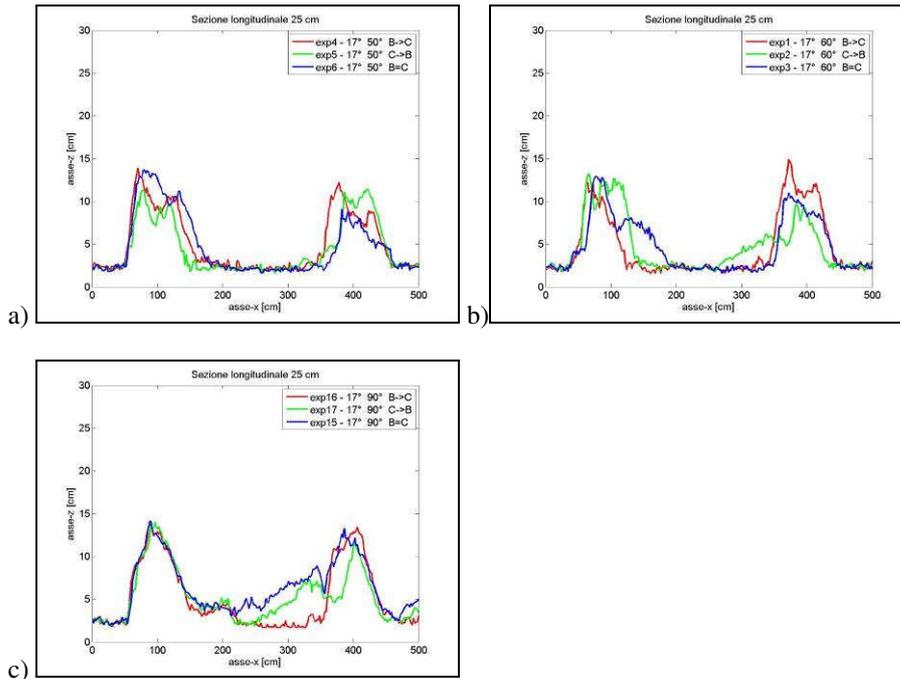


Figura 7.8 Andamento dei profili longitudinali di deposito nel canale A rilevati lungo la sezione posta a 25 cm dalla parete dove sono le confluenze, costruito al variare delle differenti condizioni di innesco monte-valle (B->C), valle-monte (C->B), contemporaneo (B=C) ma mantenendo costanti pendenza delle canalette laterali (17°) e angolo di confluenza rispettivamente pari a: a) 50° ; b) 60° ; c) 90° .

7.3.3 Analisi sui profili trasversali rilevati nella sezione dove è collocato il centro di massa del deposito di colata.

Le analisi relative al profilo trasversale del deposito sono state anche condotte facendo riferimento alla sezione dove è collocato il centro di massa. In Figura 7.9 si riporta un grafico dove vengono rappresentati i profili trasversali, rilevati nella sezione trasversale del canale A dove è posizionato il centro di massa del deposito, relativi agli esperimenti svolti per pendenza dei canali B e C a 17° e condizione di innesco con fenomeno di colata prima a monte (canale B) e poi a valle (canale C) e rispettivamente con angolo di confluenza 50° (Figura 7.9a), angolo di confluenza 60° (Figura 7.9b) e angolo di confluenza 90° (Figura 7.9c).

Dall'analisi di Figura 7.9a si nota che considerando esperimenti a pendenza costante e condizione di innesco costante all'aumentare dell'angolo di confluenza l'interferenza tra i depositi aumenta, tale andamento viene confermato anche in Figura 7.9b e in Figura 7.9c dove se pur variando le condizioni di innesco, si osserva sempre che, mantenendo costante la condizione di innesco e la pendenza, all'aumentare dell'angolo di confluenza l'interferenza tra i depositi aumenta.

Inoltre effettuando un confronto tra le Figure 7.9a-b-c si evince che l'interferenza minore si ha per la condizione di tempistica di innesco con fenomeno prima a monte (canale B) e poi a valle (canale C), una condizione intermedia si ha per tempistica di innesco con fenomeno prima a valle (canale C) e poi a monte (B) e infine la condizione più gravosa si ha per tempistica di innesco con fenomeni contemporanei, mentre l'interferenza maggiore si ha per l'esperimento caratterizzato da angolo di confluenza 90° e tempistica di innesco con fenomeni di colata contemporanei.

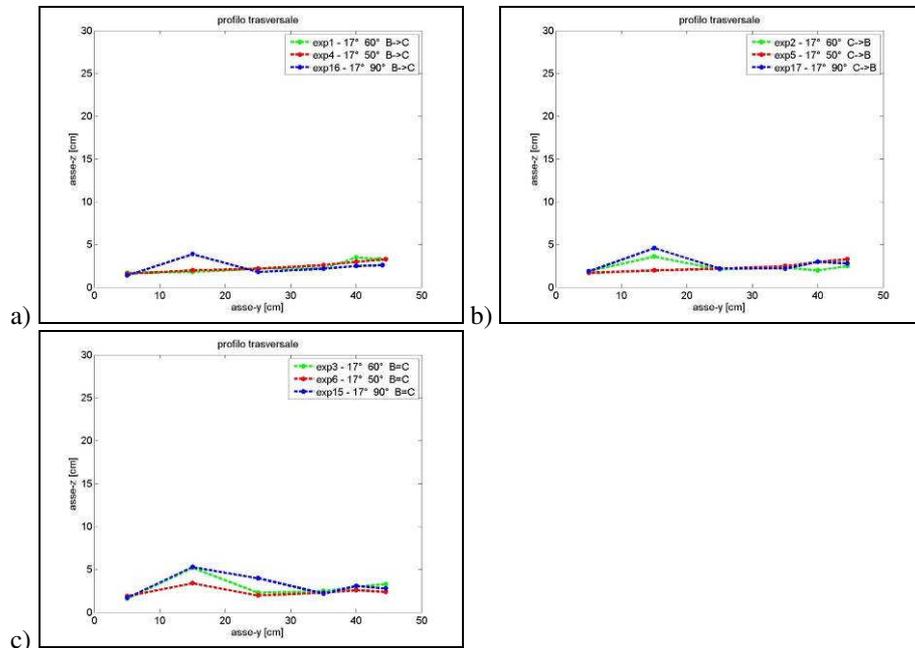


Figura 7.9 Confronto al variare dell'angolo di confluenza (50° - 60° - 90°) tra profili trasversali rilevati lungo la sezione dove risulta collocato il centro di massa rispettivamente per esperimenti con pendenza dei canale B e C costante 17° e condizione di innesco rispettivamente: a) innesco monte-valle; b) innesco valle-monte; c) innesco contemporaneo.

In Figura 7.10 si riportano i grafici costruiti al variare dell'angolo di confluenza (50° - 60° - 90°) con pendenza dei canale B e C costante pari a 15° rispettivamente a differenti condizioni di innesco: innesco con fenomeno prima a monte (canale B) e poi a valle (canale C) (Figura 7.10a), innesco con fenomeno prima a valle (canale C) e poi a monte (canale B) (Figura 7.10b) e innesco contemporaneo (Figura 7.10c).

Dall'analisi di Figura 7.10a-b-c si evince che la condizione di interferenza maggiore si trova per angoli di confluenza maggiori.

Infine, effettuando un confronto tra Figura 7.9a-b-c ricavate per esperimenti con pendenza 17° e Figura 7.10a-b-c ricavate per esperimenti con pendenza 15° si evince che in generale l'interferenza maggiore si riscontra per pendenze maggiori.

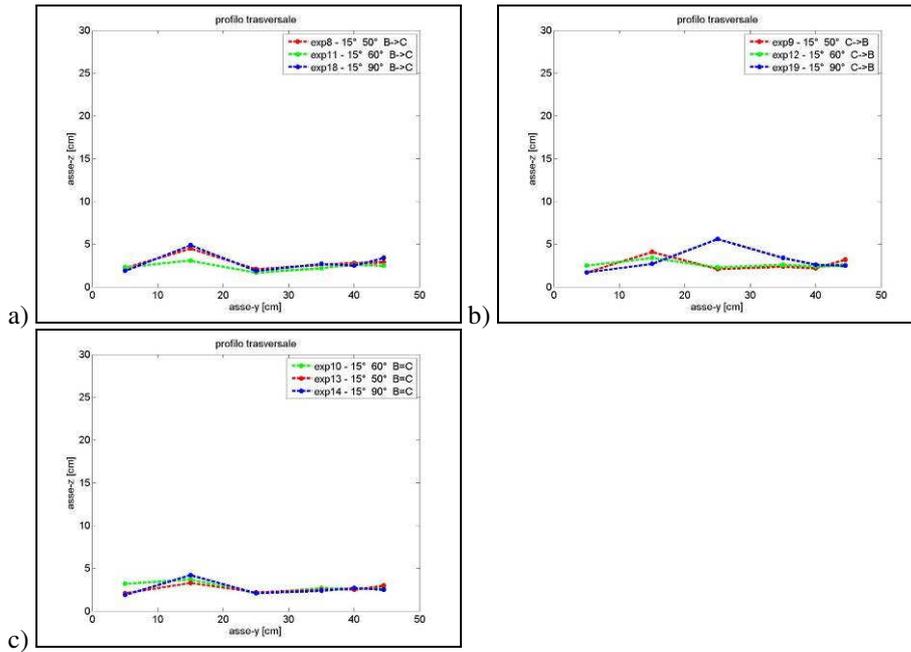


Figura 7.10 Confronto al variare dell'angolo di confluenza (50° - 60° - 90°) tra profili trasversali rilevati lungo la sezione dove risulta collocato il centro di massa rispettivamente per esperimenti con pendenza dei canale B e C costante 15° e condizione di innesco rispettivamente: a) innesco monte-valle; b) innesco valle-monte; c) innesco contemporaneo.

7.3.4 Analisi dei depositi basate sui parametri caratteristici della colata

Come prima anticipato l'analisi sulla geometria dei depositi è stata condotta anche tramite il confronto dei parametri caratteristici delle colate. A riguardo si è determinato il volume di deposito complessivo rilevato lungo la canaletta A per ogni esperimento. Il volume di deposito determinato si riferisce soltanto all'area interessata dal rilievo con il micrometro di precisione; area che ha un'estensione lineare lungo la canaletta A di 5m e che risulta essere quella maggiormente interessata dai fenomeni di morfodinamica del deposito.

In Figura 7.11 viene presentato il grafico sui volumi di deposito costruito al variare dell'angolo di confluenza. Dall'analisi dell'andamento generale presentato in Figura 7.11 si evince che all'aumentare dell'angolo di confluenza il volume di deposito ottenuto è maggiore. Qualche anomalia si è riscontrata nell'esperimento 14 per il quale, come descritto al capitolo 6, durante l'esecuzione della prova si è rilevato l'ammasso posizionato lungo le canalette laterali non è stato coinvolto nella globalità nella formazione della frana, generando così volumi minori.

In Figura 7.12 viene presentato il grafico sui volumi di deposito costruito al variare dell'angolo di pendenza dei canali B e C, da cui si evidenzia che per pendenze maggiori

in generale corrispondono volumi maggiori di deposito, in quanto la corrente che defluisce lungo il canale A esercita una forza erosiva minore sui depositi.

Dall'andamento dei grafici in Figura 7.11 e in Figura 7.12 si osserva che la condizione caratterizzata da volumi di deposito maggiori, e quindi più gravosa, è realizzata per l'esperimento condotto con pendenza maggiore (17°), angolo di confluenza maggiore (90°) e condizione di innesco contemporanea; mentre l'esperimento caratterizzato da volumi minori, e quindi meno gravoso tra quelli esaminati, è quello caratterizzato da pendenze minori (15°), angolo di confluenza minore (50°) e condizione di innesco prima a valle e poi a monte.

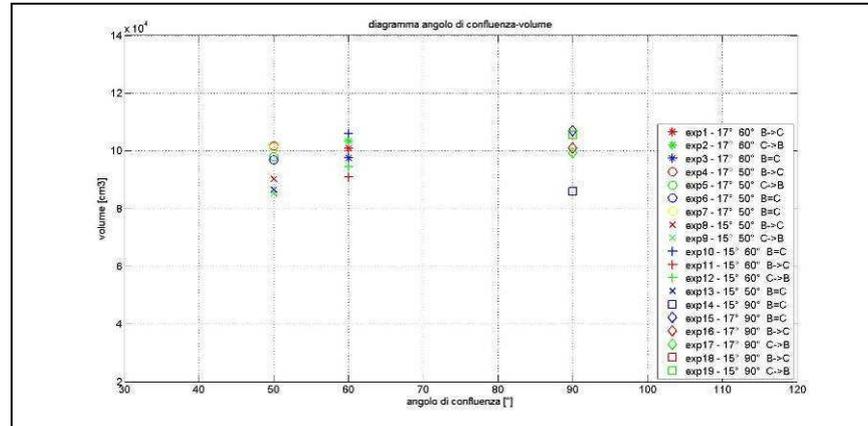


Figura 7.11 Volumi di deposito rilevati alla fine di ogni esperimento in funzione dell'angolo di confluenza.

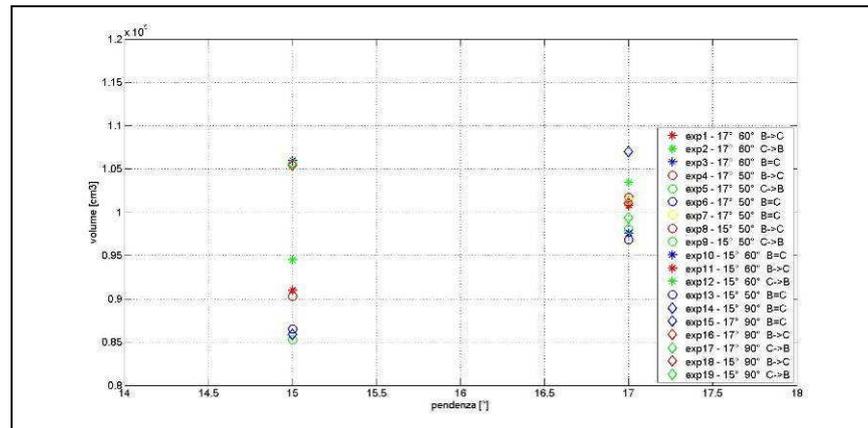


Figura 7.12 Volumi di deposito rilevati a fine esecuzione di ogni esperimento in funzione della pendenza dei canali B e C.

Ulteriori analisi sono state svolte considerando il posizionamento del centro di massa relativo all'interno deposito rilevato lungo il canale A. In Figura 7.13 si riporta un grafico dove viene rappresentato il posizionamento del centro di massa, per le coordinate (X_G , Y_G , Z_G), in funzione dell'angolo di confluenza delle canalette laterali.

Considerando che la sezione intermedia tra gli sbocchi delle canalette laterali si colloca alla progressiva 210 lungo l'asse x, in Figura 7.13 si evidenzia che, come era logico prevedere, a causa della forzante del trasporto solido (portata liquida lungo il canale A) i centri di massa sono tutti posizionati più a valle rispetto tale sezione. Inoltre si evidenzia che la maggior ostruzione, con valori lungo l'asse y maggiori, viene rilevata nei casi con innesco contemporaneo, in generale aumentando il grado di ostruzione della sezione all'aumentare dell'angolo di confluenza. Mentre si osserva scarsa variabilità nella quota di posizionamento del centro di massa. Infatti sull'asse z vengono osservate variazioni dell'ordine di 1 cm.

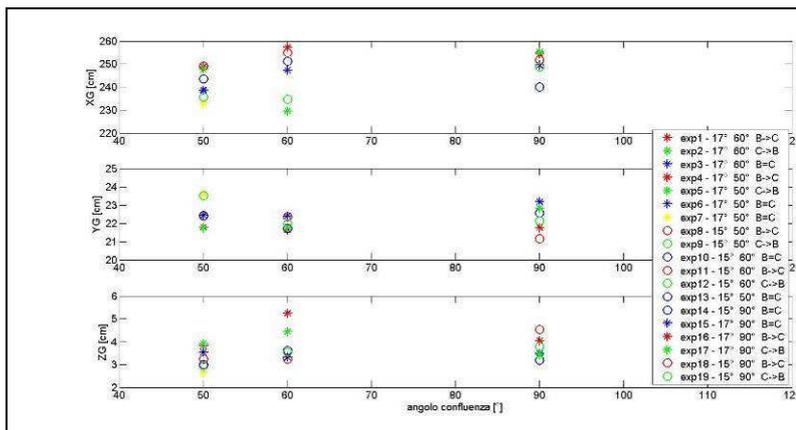


Figura 7.13 Posizionamento del centro di massa rispettivamente lungo l'asse longitudinale del canale A (asse-x), l'asse trasversale del canale A (asse-y) e l'asse ortogonale (asse-z).

7.3.5 Analisi condotte su esperimenti con stessa tempistica di innesco al variare dei parametri caratteristici della colata.

Nel presente paragrafo sono presentati i risultati acquisiti per gli esperimenti caratterizzati da uguale tempistica di innesco e uguale pendenza. In particolare in Figura 7.14 vengono riportati gli esperimenti condotti con tempistica di innesco caratterizzata da propagazione di colata prima lungo il canale B (canale di monte) e poi lungo il canale C (canale di valle) e con pendenza dei canali laterali (canale B e C) pari a 17° . Il volume di deposito rilevato sul fondo del canale A, facendo un confronto tra gli esperimenti condotti con angoli di confluenza $50^\circ - 60^\circ - 90^\circ$, è pressoché costante e pari a circa 100.000 cm^3 (Figura 7.14a). Tale valore rappresenta il 56% del volume complessivo di ammasso disposto lungo le canalette laterali (180.000 cm^3). In generale si riscontrano volumetrie di deposito decisamente minori rispetto a quelle di partenza a causa della forte erosione esercitata dalla corrente idrica che defluisce lungo il canale A.

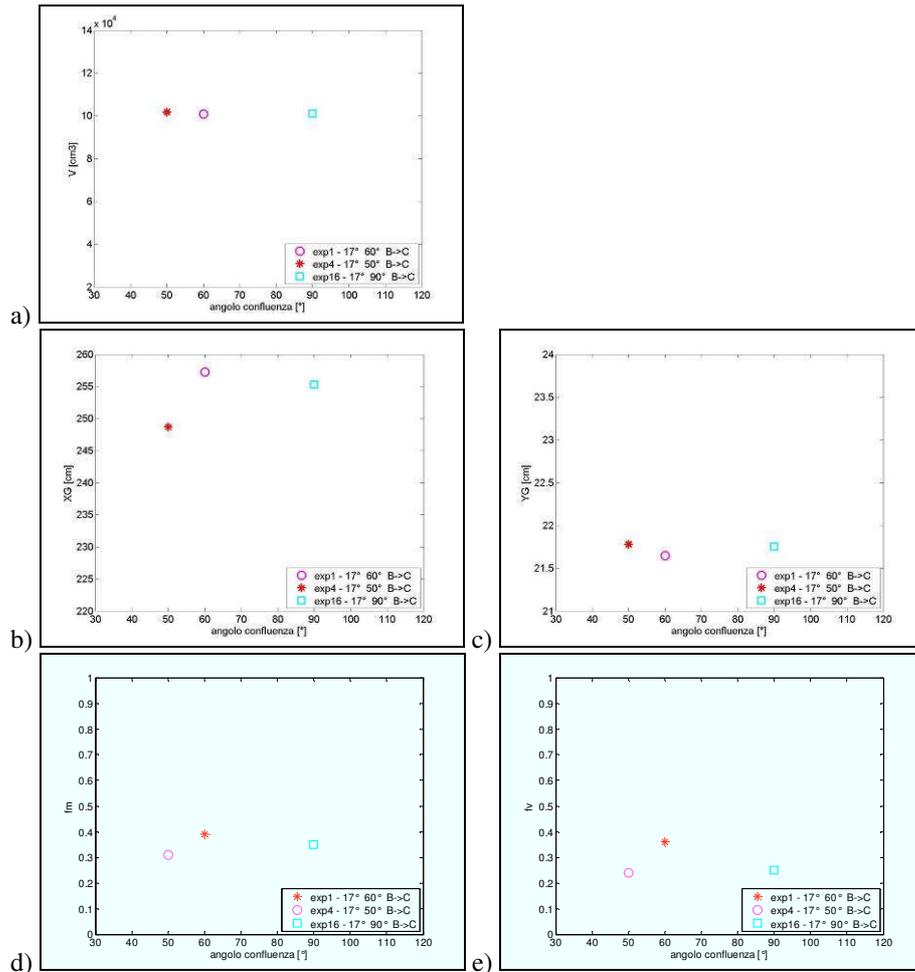


Figura 7.14 Andamento dei parametri caratteristici del deposito al variare dell'angolo di confluenza 50° - 60° - 90° per esperimenti condotti con tempistica di innesco costante (monte-valle) e pendenza dei canali B e C pari a 17° rispettivamente in funzione di: a) volume di deposito; b) posizione del centro di massa del deposito lungo l'asse longitudinale del canale A (asse-x); c) posizione del centro di massa del deposito lungo l'asse trasversale del canale A (asse-y); d) fattore di forma del deposito di monte allo sbocco del canale B; e) fattore di forma del deposito di valle allo sbocco del canale C.

Inoltre in Figura 7.15 si riportano i risultati degli esperimenti condotti, sempre con tempistica di innesco caratterizzata da propagazione di colata prima lungo il canale B (canale a monte) e poi lungo il canale C (canale di valle), ma con pendenza delle canalette laterali a 15°.

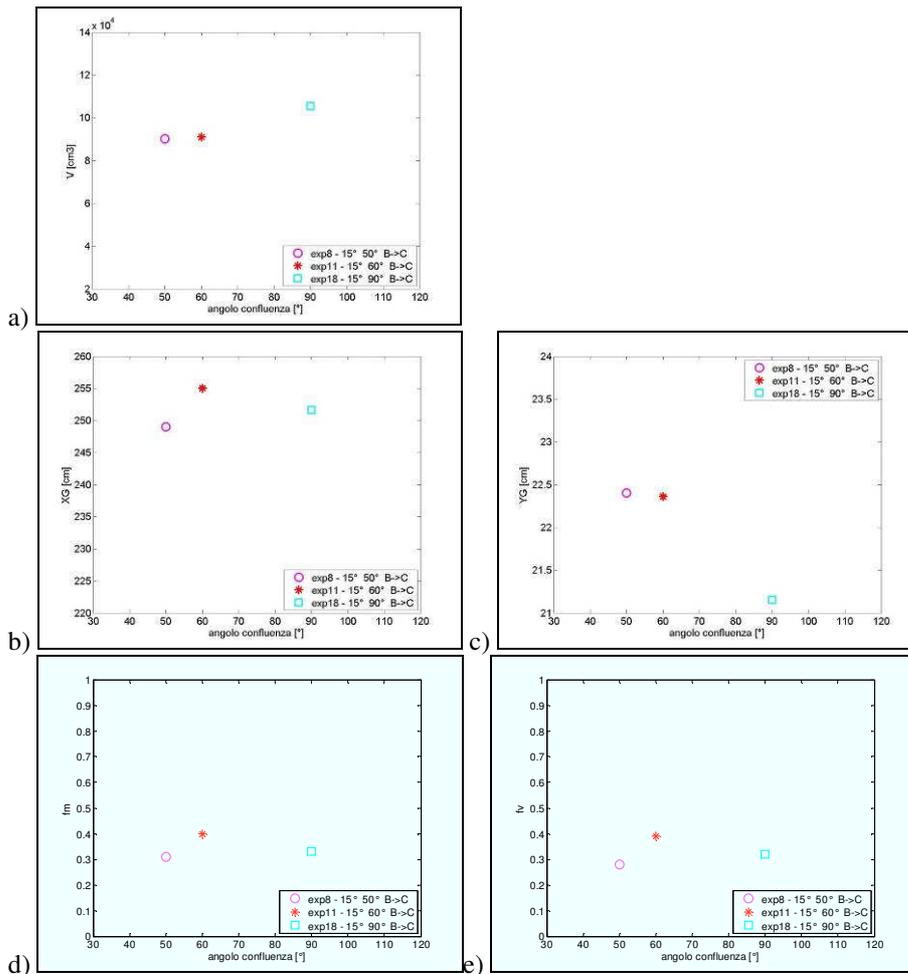


Figura 7.15 Andamento dei parametri caratteristici del deposito al variare dell'angolo di confluenza 50° - 60° - 90° per esperimenti condotti con tempistica di innesco costante (monte-valle) e pendenza dei canali B e C pari a 15° rispettivamente in funzione di: a) volume di deposito; b) posizione del centro di massa del deposito lungo l'asse longitudinale del canale A (asse-x); c) posizione del centro di massa del deposito lungo l'asse trasversale del canale A (asse-y); d) fattore di forma del deposito di monte allo sbocco del canale B; e) fattore di forma del deposito di valle allo sbocco del canale C.

Dall'analisi della Figura 7.15a si rileva un aumento dei volumi di deposito al crescere dell'angolo di confluenza. In particolare la corrente idrica lungo il canale A esercita un'erosione sempre maggiore al decrescere dell'angolo di confluenza. Quindi è possibile affermare che per gli esperimenti caratterizzati da angolo di confluenza minore il trasporto solido osservato è maggiore. In questi casi il materiale detritico viene

trasportato più a valle della zona di rilievo (costituita dai primi 5 m del canale A, che invece ha una estensione complessiva di 12 m), ciò causa volumi di deposito a fine esperimento di minori entità. Quindi, come previsto, per angoli di confluenza minori, il trasporto solido lungo il canale A è favorito.

Inoltre effettuando un confronto tra le volumetrie di deposito relative agli esperimenti condotti per uguale condizione di innesco (monte-valle) ma con pendenza dei canali laterali rispettivamente 15° e 17° (Figura 7.14a e Figura 7.15a) si riscontrano per gli esperimenti condotti a pendenza minore (15°) un volume di deposito finale minore sia per angolo di confluenza 50° che per angolo di confluenza 60° .

Occorre sottolineare che per gli esperimenti caratterizzati da pendenze delle canalette laterali minori il deposito formato a valle della confluenza essendo meno ripido risulta più facile da erodere e quindi ne risulta un trasporto solido verso valle più ingente. Questa affermazione trova conferma anche dall'analisi svolta per i profili longitudinali rappresentati in Figura 7.7a-b.

Pertanto per gli esperimenti con pendenza 15° e angolo di confluenza 50° e 60° , il volume minore rispetto agli esperimenti con pendenze maggiori è attribuibile al trasporto di materiale defluito più a valle della zona di rilievo; mentre per gli esperimenti caratterizzati da angolo di confluenza di 90° si osserva che il trasporto è minore rispetto alle altre configurazioni investigate (50° e 60°) e in tal caso infatti si rilevano volumi maggiori ma per 15° essendo la forzante del deflusso maggiore ed essendo la sezione maggiormente occlusa dal deposito più a valle il materiale si posiziona nella zona di interferenza aumentando il volume di deposito rilevato rispetto all'esperimento con pendenza 17° .

Sempre per gli esperimenti prima presentati in Figura 7.14c-d e in Figura 7.15c-d si è valutato anche il posizionamento del centro di massa in funzione dell'angolo di confluenza considerando le coordinate del centro di massa in pianta.

Da Figura 7.14c si evince che per angoli di 60° il centro di massa si colloca più a valle rispetto alle altre condizioni di angolo considerate 50° e 90° , questa non linearità dei risultati per la posizione del centro di massa è stata indagata attentamente svolgendo ulteriori analisi. In particolare, si è investigata la posizione del centro di massa considerando il singolo deposito fornito allo sbocco del canale B e non il deposito globale realizzato lungo il canale A. In questo caso si è studiata la posizione del centro di massa del deposito allo sbocco del canale di monte (canale B) per esperimenti condotti con tempistica di innesco scandita da fenomeno prima a monte e poi a valle. I risultati relativi alla posizione del centro di massa relativi al solo deposito collocato lungo il canale A allo sbocco del canale C vengono riportati in Figura 7.16. In particolare si riportano rispettivamente: a) la posizione del centro di massa lungo l'asse longitudinale del canale A in funzione dell'angolo di confluenza, b) la posizione del centro di massa lungo l'asse trasversale del canale A in funzione dell'angolo di confluenza, c) la posizione in pianta del centro di massa quindi in funzione dell'asse longitudinale e trasversale del canale A. In tal caso si ha, come d'altronde previsto, una coordinata maggiore lungo l'asse longitudinale (asse-x) per l'esperimento a 50° rispetto a quello di 60° (Figura 7.16a). Pertanto si osserva che l'erosione dei depositi aumenta al diminuire dell'angolo di confluenza, anche perché in entrambi i due esperimenti (caratterizzati da angolo di confluenza 50° e angolo di confluenza 60°) hanno la stessa coordinata lungo l'asse trasversale della canaletta A (asse-y) (Figura 7.16b). Mentre per

quanto riguarda l'esperimento condotto a 90° si nota uno spostamento verso valle del centro di massa, verosimilmente causato dall'interferenza tra il deposito di monte e quello di valle, come si evince anche dall'analisi dei profili longitudinali relativi agli stessi esperimenti analizzati riportati in Figura 7.17a. La maggiore interferenza tra i depositi si rende evidente in Figura 7.17a dalla minore distanza calcolata tra la fine del deposito di monte e l'inizio del deposito di valle per gli esperimenti condotti per angoli di confluenza di 90° .

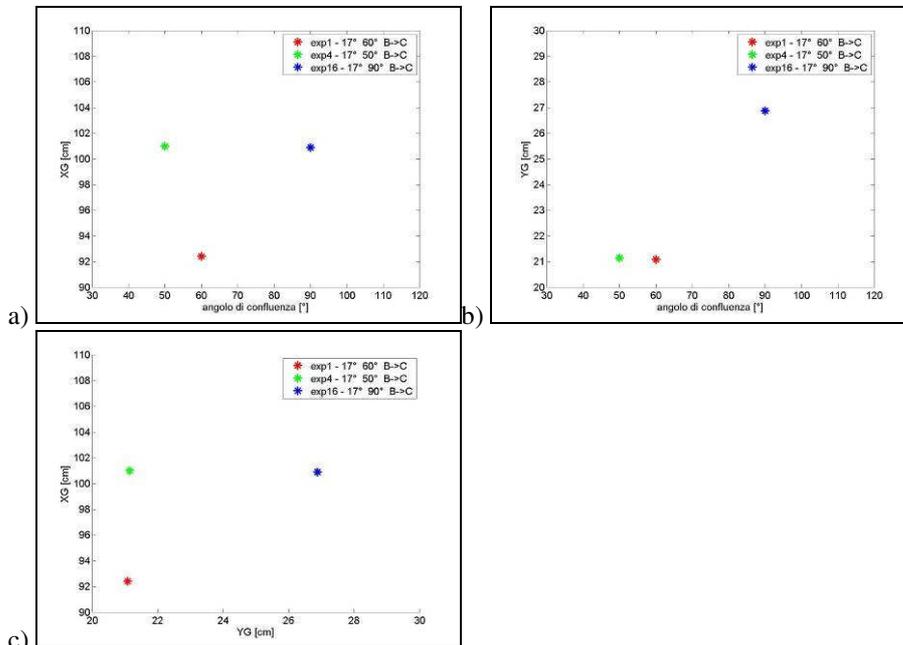


Figura 7.16 Posizione del centro di massa al variare dell'angolo di confluenza 50° - 60° - 90° relativo al solo deposito in corrispondenza dello sbocco del canale B per esperimenti condotti con pendenza dei canali B e C pari a 17° e tempistica di innesco costante monte-valle, rappresentato nelle seguenti tipologie : a) angolo di confluenza - asse longitudinale del canale A (asse-x); b) angolo di confluenza - asse trasversale del canale A (asse-y); c) - asse longitudinale del canale A (asse-x) - asse trasversale del canale A (asse-y).

Dall'analisi tra i grafici in Figura 7.16 a-b e quelli redatti per esperimenti condotti con uguali parametri ma con pendenza delle canalette laterali di 15° (Figura 7.18 a-b), si evince che il fenomeno di trasporto è notevolmente maggiore nel caso di pendenze minori (15°), tanto è vero che se analizziamo il posizionamento del centro di massa lungo l'asse longitudinale del canale A (asse-x) (Figura 7.16 a e Figura 7.18a) per gli esperimenti con angolo di confluenza 50° e 60° si osserva che il centro di massa, per entrambe le citate configurazioni di angolo di confluenza, si colloca verso valle in caso di pendenza minore (15°). Tale evidenza sperimentale è stata osservata anche

precedentemente durante l'analisi condotta circa i volumi di deposito (Figura 7.14a e Figura 7.15a), dove si affermava che per pendenze minori si rilevano valori minori di volume di deposito finale a causa del maggiore trasporto. Mentre per l'angolo di confluenza di 90° , come previsto, si osserva che il trasporto lungo l'asse longitudinale del canale A (asse-x) è minore rispetto al fenomeno di trasporto registrato per esperimenti con angoli di confluenza di 50° e 60° e, in particolare, mettendo a confronto Figura 7.16a e Figura 7.18a, si nota che la posizione del centro di massa rimane pressoché la stessa lungo l'asse-x, mentre in relazione al posizionamento del baricentro lungo l'asse trasversale (asse-y) per il caso a pendenza di 15° si ha una coordinata minore dovuta alla maggiore erosione della corrente a pendenze minore. Il deposito risulta disposto in maniera più compatta e aderente alla parete in cui sono collocate le confluenze.

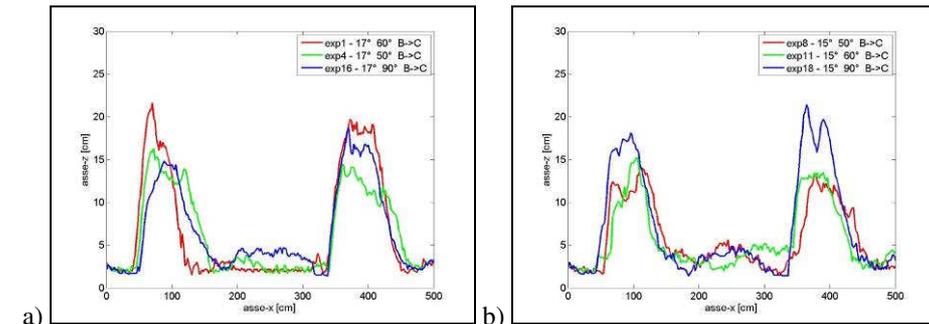


Figura 7.17 Confronto al variare dell'angolo di confluenza 50° - 60° - 90° per esperimenti condotti con tempistica di innesco costante (monte-valle) e pendenza dei canali B e C rispettivamente: a) 17° ; b) 15° .

L'analisi del comportamento dei singoli depositi ha consentito di individuare le dinamiche caratteristiche dei fenomeni di colata in confluenza. Inoltre si può affermare che la non linearità dei risultati ottenuti relativi al posizionamento del centro di massa dell'intero deposito di colata (Figura 7.14 b-c e Figura 7.15 b-c) è attribuibile all'interazione tra i fenomeni di deposito che avvengono allo sbocco delle due confluenze considerate.

Per quanto concerne l'analisi del deposito complessivo, i fattori di forma determinati rispettivamente per la zona di deposito a valle dello sbocco del canale B (fattore di forma di monte f_B) e per la zona di deposito a valle dello sbocco del canale C (fattore di forma di valle f_C) si evince che per lo stesso esperimento (indicati con simboli di uguale forma e uguale colore in Figura 7.14 d e in Figura 7.14e) il fattore di forma relativo al deposito a monte è maggiore rispetto a quello di valle, condizione verosimilmente determinata dalla tempistica di innesco monte-valle con cui sono stati svolti gli esperimenti. Inoltre effettuando un confronto tra gli esperimenti condotti con pendenze di 17° e 15° (Figura 7.14 d-e e Figura 7.15 d-e) si evidenzia che gli esperimenti a pendenze maggiori sono sempre caratterizzati da fattore di forma minore, quindi depositi più allungati, che ostruiscono maggiormente e quindi indicativi di un rischio maggiore.

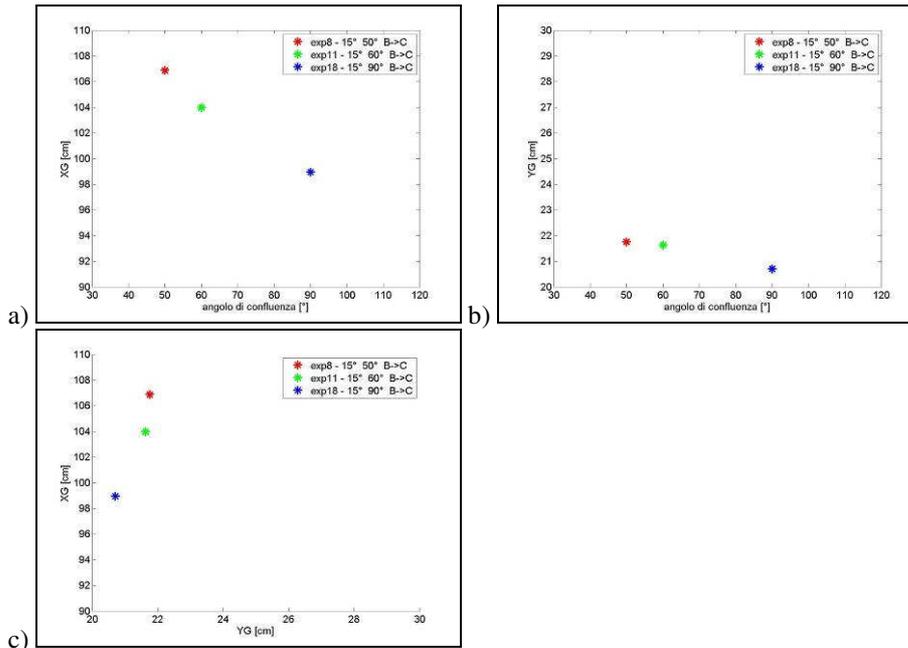


Figura 7.18 Posizione del centro di massa al variare dell'angolo di confluenza 50° - 60° - 90° relativo al solo deposito in corrispondenza dello sbocco del canale B per esperimenti condotti con pendenza dei canali B e C pari a 15° e tempistica di innesco costante monte-valle, rappresentato nelle seguenti tipologie : a) angolo di confluenza - asse longitudinale del canale A (asse-x); b)angolo di confluenza - asse trasversale del canale A (asse-y); c) - asse longitudinale del canale A (asse-x) - asse trasversale del canale A (asse-y).

Infine allo scopo di fornire un quadro sinottico si presenta in Figura 7.19 una banale semplificazione delle conclusioni ottenute dai risultati scaturiti dalla campagna sperimentale condotta. A tal proposito è possibile affermare che l'analisi condotta sui depositi rilevati alla fine di ogni esperimento lasciando drenare l'acqua in essi contenuta ha evidenziato che, all'aumentare dell'angolo di confluenza e della pendenza dei canali laterali si hanno condizioni di maggiore deposito e, dunque, di maggiore pericolosità (aumento della possibilità che si realizzino interferenze tra i depositi e conseguenti ostruzioni). Mentre per quanto concerne la tempistica di innesco, si rileva che condizioni caratterizzate da maggiore pericolosità per innesco contemporaneo, da media pericolosità per innesco con fenomeno prima a valle e poi a monte, da minore pericolosità per innesco fenomeno prima a monte e poi a valle.

Angolo di confluenza		
50°	60°	90°
Pendenza dei canali B e C		
15°	17°	
Tempistica di innesco		
B->C	C->B	B=C

- **Interferenza tra i depositi** → +

Figura 7.19 Quadro sinottico dei risultati scaturiti dalle indagini di laboratorio.

8. CONCLUSIONI

Il presente lavoro di tesi ha riguardato l'analisi di fenomeni di interazione di colate detritiche con approccio sia numerico che sperimentale.

Per quanto concerne l'approccio numerico, l'obiettivo specifico è stato quello di investigare l'applicabilità di codici esistenti a casi di studio complessi caratterizzati da piccoli bacini e confluenze multiple interagenti tra loro. Per quanto riguarda l'analisi sperimentale, ci si è focalizzati sulla verifica dell'influenza di alcuni parametri (quali la pendenza e l'angolazione della confluenza, la tempistica del fenomeno) sulla dinamica della propagazione delle colate in condizioni di confluenze multiple.

In entrambi i casi la ricerca svolta ha preso spunto dall'evento calamitoso che si è verificato nel Messinese durante la notte del 1° ottobre 2009. Tale evento meteorico, noto anche per i numerosi danni recati e per la perdita di vite umane, è stato assunto come caso studio con particolare riguardo a quanto accaduto nel villaggio di Giampilieri Superiore. A riguardo sono state condotte diverse analisi preliminari volte alla caratterizzazione dell'evento, ossia alla definizione della topografia (pre e post evento), della magnitudo delle colate e della caratterizzazione reologica delle colate stesse.

Più in dettaglio, sono stati applicati due differenti codici: il FLO-2D e il TRENT-2D, indagandone le performances.

Il modello FLO-2D è un modello quasi bidimensionale e adotta un approccio reologico monofasico, implementato attraverso le relazioni empiriche sviluppate da O'Brien e Julien (1985). Il modello TRENT-2D è pienamente bidimensionale e assume un approccio bifase per la schematizzazione della reologia della colata, basandosi sul più sofisticato metodo granulo-inerziale di Bagnold-Takahashi (1978). Inoltre, il FLO-2D è un modello a fondo fisso, mentre il TRENT-2D è in grado di tener conto della variazione del fondo in maniera accoppiata alla dinamica della miscela. Le simulazioni effettuate hanno mostrato come il FLO-2D necessiti di operazioni preliminari per la taratura dei parametri reologici, svolte nella fattispecie tramite tecniche di back analysis. Le simulazioni hanno, altresì, evidenziato come il TRENT-2D, implementando una legge reologica basata su parametri fisici e non empirici, non necessiti di operazione preliminari di taratura. I codici sono stati applicati al caso studio di Giampilieri in modo da investigare e validare la loro applicabilità in casi studio reali caratterizzati da confluenze multiple e da bacini di piccole dimensioni. Le grandezze ottenute tramite i modelli, in particolare, i livelli di deposito e le velocità delle colate, sono state confrontate con dati acquisiti in situ da chi scrive. I risultati hanno mostrato come entrambi i modelli siano capaci di riprodurre in maniera accurata il percorso compiuto dalla colata all'interno di zone densamente urbanizzate. In particolare, il FLO-2D tende a sovrastimare i massimi livelli di colata osservati sulla zona alluvionale, mentre il TRENT-2D li sottostima leggermente. Riguardo invece ai depositi osservati, entrambi i modelli li sottostimano. Infine, le velocità osservate durante le simulazioni del FLO-2D sono generalmente maggiori rispetto a quelle rilevate dal TRENT-2D: tale differenza è attribuibile alle differenti reologie adottate. Infine, si ritiene opportuno segnalare che il FLO-2D è dotato di una interfaccia grafica che lo rende "user friendly", inoltre il codice permette di modellare la presenza di elementi antropici rendendo l'applicazione in

ambiente urbano semplice anche in presenza di opere di mitigazione; mentre il TRENT-2D è basato su equazioni reologiche fisicamente basate che non necessitano di operazioni di taratura e inoltre è capace di considerare l'evoluzione del fondo alveo durante il processo di propagazione.

L'approfondimento della meccanica della propagazione dei fenomeni di colata in condizioni di confluenze multiple è stato condotto anche tramite un'indagine di laboratorio. In particolare, ispirandosi al sopra citato caso di Giampileri, è stata progettata e realizzata una installazione sperimentale presso il Laboratorio di Idraulica dell'Università di Padova.

L'apparato sperimentale è costituito da un canale principale (canale A) e da due canalette secondarie, entrambe confluenti in sinistra idraulica (canali B e C muovendosi da monte verso valle). Il canale A è lungo 9 m, presenta una sezione rettangolare 50 cm x 70 cm ed è a inclinazione variabile. I canali laterali (B e C), entrambi a pendenza variabile, presentano la stessa geometria; essi, infatti, sono lunghi 6 m, con una sezione rettangolare di 30 cm x 30 cm. Nel corso degli esperimenti l'evoluzione delle colate e l'analisi dei corrispondenti depositi sono state seguite tramite un sistema integrato di celle di pressione, di sonde di livello ad ultrasuoni e di videocamere.

La campagna sperimentale condotta, oltre ad una serie piuttosto ampia di prove di taratura e di messa a punto della strumentazione adottata, è consistita in diciannove differenti esperimenti. In particolare, mantenendo costante la portata fluente nel canale principale A, sono stati fatti variare i seguenti parametri: l'angolo di confluenza dei canali B e C, la pendenza delle canalette laterali B e C e lo sfasamento tra gli istanti di innesco delle colate detritiche generate nelle due canalette.

L'analisi dei dati acquisiti dalle celle di pressione e dalle sonde di livello posizionate in maniera accoppiata ha consentito l'identificazione delle varie fasi che caratterizzano l'evoluzione dei depositi. E più precisamente: i) fase iniziale di saturazione dell'ammasso inizialmente collocato nei canali B e C; ii) fase di sviluppo della colata detritica; iii) formazione del deposito e sua successiva morfodinamica per effetto della portata fluente nel canale principale; iv) drenaggio dell'ammasso di materiale depositato. L'analisi dei profili di deposito è stata condotta effettuando analisi sul profilo longitudinale e sul profilo trasversale del deposito rilevato nel canale A. Inoltre, sono state effettuate analisi basate sui parametri caratteristici del deposito. In particolare, le analisi longitudinali hanno fornito un contributo conoscitivo maggiore sul singolo deposito collocato nelle zone prossime alle confluenze e solo in parte sulle interferenze, mentre l'analisi del profilo trasversale rilevato nella sezione in cui ricadeva centro di massa del deposito ha fornito un contributo conoscitivo importante sull'interferenza tra le due colate. Dall'analisi sul deposito condotta tramite il confronto dei parametri caratteristici è stato possibile evidenziare alcune non linearità sul posizionamento del centro di massa, verosimilmente attribuibili alla interazione tra le confluenze. Volendo riportare una sintesi delle evidenze sperimentali è possibile affermare che l'analisi condotta sui depositi rilevati alla fine di ogni esperimento lasciando drenare l'acqua in essi contenuta ha evidenziato che, all'aumentare dell'angolo di confluenza e della pendenza dei canali laterali si hanno condizioni di maggiore deposito e, dunque, di maggiore pericolosità (aumento della possibilità che si realizzino interferenze tra i depositi e conseguenti ostruzioni). Mentre per quanto concerne la tempistica di innesco, si rileva che condizioni caratterizzate da maggiore

pericolosità per innesco contemporaneo, da media pericolosità per innesco con fenomeno prima a valle e poi a monte, da minore pericolosità per innesco fenomeno prima a monte e poi a valle.

Infine, si ritiene che la ricerca svolta, rappresenti un contributo metodologico e, almeno in parte, anche applicativo nel campo della mitigazione del rischio da colate detritiche.

RINGRAZIAMENTI

Un ringraziamento va agli ing. Luca Cavallaro, Carla Faraci, Rosaria Musumeci e Pietro Scandura, membri dello staff del prof. Foti, con i quali ho intrattenuto interessanti discussioni e che hanno fornito spunti di riflessione sempre volti a migliorare la tesi. Gli altri membri dello staff del prof. Foti, Cinzia La Rocca e Vincenzo Nicolosi che sono stati compagni durante le tante giornate di sopralluogo trascorse a Messina.

Inoltre desidero ringraziare il prof Bovolin dell'Università di Salerno per gli interessanti insegnamenti sia durante le indagini di campo che durante le indagini numeriche svolte con il FLO-2D. Il prof. Rosatti e l'ing. Begnudelli dell'Università di Trento che sono stati entrambi molto disponibili nel fornirmi aiuto per l'applicazione del TRENT-2D.

Desidero ringraziare il personale tecnico del Laboratorio di Padova, l'ing Enrica Belluco, l'ing. Salmaso e il responsabile di Laboratorio Frizzerin per l'aiuto fornito durante la fase di progettazione e realizzazione dell'apparato strumentale.

Un grazie di cuore lo devo ai tesisti e ai tirocinanti, Giacomo Galiano, Gabriele Barban e Simone Bortolami con cui ho avuto la possibilità di collaborare. Sono stati aiuti insostituibili per lo svolgimento della campagna sperimentale.

Voglio altresì ringraziare i supervisori che si sono susseguiti alla guida della tesi, il prof. Giuseppe Rossi, durante i miei primi due anni, ed il prof. Antonio Cancelliere sotto la cui guida questa mia esperienza è arrivata a conclusione.

Ringrazio il Prof. Lanzoni dell'Università di Padova, co-tutor di questa tesi, per avermi dato la possibilità di effettuare la campagna sperimentale presso il loro Laboratorio e per avermi aiutato e insegnato tanto durante tutto lo svolgimento della campagna sperimentale.

Infine il più sentito grazie va al relatore di questo lavoro di tesi il prof. Enrico Foti che mostrando ogni giorno grande dedizione e passione per questo lavoro mi ha accompagnato durante tutto il ciclo di dottorato.

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1.1	Fasi del lavoro svolto.....	5
Figura 2.1	Rappresentazione schematica delle differenti parti che compongono la colata detritica.....	8
Figura 2.2	Rappresentazione schematica delle differenti parti che compongono la colata detritica con riferimento al caso di un pendio del Messinese dal quale si sono innescate diverse colate durante l'evento del 1 ottobre 2009.....	10
Figura 3.1	Reogramma dei diversi tipi di fluido, raffigurante l'andamento delle sollecitazioni di taglio in funzione della velocità di deformazione per diversi tipi di fluido.....	16
Figura 4.1	Rappresentazione dei processi fisici simulati da FLO-2D.....	27
Figura 4.2	Rappresentazione della modellazione del campo di moto dell'interfaccia tra canali e terreno.....	27
Figura 4.3	Sistema di riferimento adottato nella modellazione e definizione delle variabili per TRENT2D (Manuale TRENT2D, 2011).....	30
Figura 4.4	Vista d'insieme dell'abitato di Giampilieri e degli affluenti al torrente Giampilieri (Torrenti Loco, Sopra Urno e Puntale) che attraversano il centro abitato.....	31
Figura 4.5	Immagine dell'abitato di Giampilieri, dove sono indicate le estensioni dei bacini del Loco, Sopra Urno e Puntale.....	32
Figura 4.6	Torrente Loco: immissione nel torrente Giampilieri in corrispondenza della strada provinciale n. 33.....	33
Figura 4.7	Torrente Loco: a) inquadramento della frana, b) edifici interessati dalla colata detritica nel tratto di valle.....	33
Figura 4.8	Torrente Loco: messa a nudo della roccia a valle della strada comunale Calvario e presenza di vasche ad uso irriguo in alveo.....	34
Figura 4.9	Torrente Loco: inizio scoscendimento in corrispondenza della strada provinciale che corre lungo il crinale.....	34
Figura 4.10	Vista frontale della frana generatasi all'interno del bacino Sopra Urno, a ridosso dell'abitato di Giampilieri Superiore.....	35
Figura 4.11	Individuazione della frana su Via Chiesa - Torrente Sopra Urno.....	35

Figura 4.12	Torrente Sopra Urno: opere di protezione realizzate dal Genio Civile di Messina a seguito dell'evento del 2007.....	36
Figura 4.13	Torrente Sopra Urno: a) colata di fango che ha interessato la via Chiesa; b) piazza di fronte alla chiesa invasa dal fango.....	36
Figura 4.14	Individuazione della frana su Via Vallone - Torrente Puntale.....	37
Figura 4.15	Torrente Puntale: colata di fango in via Vallone pochi giorni dopo l'alluvione del 1° ottobre 2009. a) vista dall'alto dei resti delle abitazioni colpite dall'impatto della frana;b) vista lato del versante dei resti delle abitazioni su via Vallone.....	37
Figura 4.16	Vista del percorso di frana sul bacino del torrente Puntale che si prolunga lungo l'abitato di via Vallone.	37
Figura 4.17	Torrente Puntale: a) tratto terminale della via Vallone già ripulita dalle colate di fango; b) Piazza Pozzo.....	38
Figura 4.18	Pletogrammi utilizzati per la simulazione dell'evento del 1° ottobre 2009: a) sul bacino del torrente Sopra Urno; b) sul bacino del torrente Puntale; c) sul bacino del torrente Loco; d) visione globale dello sviluppo dell'evento.	40
Figura 4.19	Rappresentazione grafica della area alluvionale simulata tramite FLO-2D, tramite una maglia 5x5m.	41
Figura 4.20	Rappresentazione grafica tramite contorno rosso dell'area interessata dai deflussi di colata detritica ottenuta dalla simulazione dello scenario di evento (caso 1).	42
Figura 4.21	Rappresentazione grafica della mappa di pericolosità determinata tramite la simulazione dello scenario di evento (caso1).	43
Figura 4.22	Rappresentazione grafica della mappa di pericolosità determinata tramite la simulazione dello scenario di evento, con lo sfondo la zonazione redatta dai consulenti del commissario all'emergenza all'interno dell'O.P.C.M. 10 ottobre 2009, n. 3815 (caso1).	44
Figura 4.23	Distribuzione spaziale dei massimi livelli di tirante ottenuti durante la simulazione dello scenario di evento (caso1).	44
Figura 4.24	Distribuzione spaziale dei livelli di tirante ottenuti alla fine della simulazione dello scenario di evento (caso1).....	45
Figura 4.25	Rappresentazione grafica tramite contorno rosso dell'area interessata dai deflussi di colata detritica ottenuta dalla simulazione dello scenario di evento (caso2).	46

Figura 4.26	Rappresentazione grafica della mappa di pericolosità determinata tramite la simulazione dello scenario di evento (caso2).	46
Figura 4.27	Rappresentazione grafica della mappa di pericolosità determinata tramite la simulazione dello scenario di evento, con lo sfondo la zonazione redatta dai consulenti del commissario all'emergenza all'interno dell'O.P.C.M. 10 ottobre 2009, n. 3815 (caso2).....	47
Figura 4.28	Distribuzione spaziale dei massimi livelli di tirante ottenuti durante la simulazione dello scenario di evento (caso2).....	47
Figura 4.29	Distribuzione spaziale dei livelli di tirante ottenuti alla fine della simulazione dello scenario di evento (caso2).....	48
Figura 4.30	Rappresentazione grafica tramite contorno rosso dell'area interessata dai deflussi di colata detritica ottenuta dalla simulazione dello scenario di evento (caso3).	49
Figura 4.31	Rappresentazione grafica della mappa di pericolosità determinata tramite la simulazione dello scenario di evento (caso3).	49
Figura 4.32	Rappresentazione grafica della mappa di pericolosità determinata tramite la simulazione dello scenario di evento, con lo sfondo la zonazione redatta dai consulenti del commissario all'emergenza all'interno dell'O.P.C.M. 10 ottobre 2009, n. 3815 (caso3).....	50
Figura 4.33	Distribuzione spaziale dei massimi livelli di tirante ottenuti durante la simulazione dello scenario di evento (caso3).....	50
Figura 4.34	Distribuzione spaziale dei livelli di tirante ottenuti alla fine della simulazione dello scenario di evento (caso3).....	51
Figura 4.35	Estratto della carta redatta da Ucosich, contenente i livelli di invasamento all'interno dell'abitato di Giampilieri Superiore.....	52
Figura 4.36	Aree di inondazione per lo scenario simulato con il FLO-2D.	54
Figura 4.37	Livello massimo di colata osservato per lo scenario simulato con il FLO-2D.	55
Figura 4.38	Livello finale di colata osservato per lo scenario simulato con il FLO-2D	55
Figura 4.39	Velocità massime di colata osservate per lo scenario simulato con il FLO-2D.	56
Figura 4.40	Livello massimo di colata osservato per lo scenario simulato con il TRENT-2D.	57

Figura 4.41	Livello finale di colata osservato per lo scenario simulato con il TRENT-2D.....	57
Figura 4.42	Velocità massime di colata osservate per lo scenario simulato con il TRENT-2D.....	58
Figura 4.43	Ortofoto dell'abitato di Giampilieri dove sono indicati i vari punti dove le diverse informazioni sui i livelli sono disponibili...	59
Figura 5.1	Condizioni di confluenze multiple tra i torrenti Loco, Sopra Urno e Puntale con il torrente Giampilieri collocati a ridosso dell'abitato di Giampilieri Superiore.....	65
Figura 5.2	Schema tridimensionale del sistema di canalette da adottare durante la campagna: canale principale A, canali laterali B e C...	66
Figura 5.3	Laboratorio di Idraulica di Padova: a) canaletta preesistente adottata come canale principale; b) canaletta preesistente con la schematizzazione tramite solidi di color rosso delle due canalette confluenti.....	66
Figura 5.4	Particolare della cerniera di collegamento delle canalette laterali (canale B e canale C) alla canaletta principale (canale A), che consente la variazione dell'angolo di confluenza e della pendenza delle canalette laterali.....	67
Figura 5.5	Sistema di alimentazione idrica che consente la regolazione della portata in ingresso alle due canalette laterali.....	67
Figura 5.6	Sistema carroponte e paranco a cui è attaccata la benna utilizzata come contenitore per il ghiaino da movimentare.....	68
Figura 5.7	Vista da valle della canaletta principale (canale A) e delle canalette laterali (canale B e C).....	68
Figura 5.8	Dispositivo di controllo e regolazione della portata che consente di saturare gradualmente gli ammassi granulari.....	69
Figura 5.9	Dispositivo di collegamento alla canaletta principale (canale A) che consente di variare l'angolo di confluenza evitando al contempo la fuoriuscita di acque e di sedimenti della colata.....	69
Figura 5.10	Pezzatura del materiale adottato per la presente campagna sperimentale.....	70
Figura 5.11	Vista dall'alto delle canalette con indicazione schematica del posizionamento delle celle di pressione e delle sonde di livello ad ultrasuoni e delle telecamere.....	71
Figura 5.12	Curve di calibrazione relative ai due diaframmi posizionati: a) diagramma 1 per rilevare la portata defluente lungo il canale B, b) diagramma 2 per rilevare la portata defluente lungo il canale C.	72

Figura 5.13	Informazioni relative alle celle di pressione adottate: a) modello L09 prodotto dalla Keller; b) schema di funzionamento della cella di pressione; c) schema elettrico adottato per la stabilizzazione del segnale.	72
Figura 5.14	Rette di calibrazione relative alle quattro celle di pressione adottate. In rosa le rette di calibrazione fornite della casa produttrice e in nero le rette di calibrazione trovate considerando lo speciale alloggiamento costruito a protezione della sonda stessa.	73
Figura 5.15	Dataloggers adottati durante la sperimentazione: a) modello Cr1000 della Campbell Scientific; b) connessioni dei due dataloggers al Pc e alle batterie di alimentazione.	73
Figura 5.16	Diagramma a blocchi relativo alla procedura sperimentale adottata.	75
Figura 6.1	Depositi lungo la canaletta A in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.1 ad esperimento concluso: a) vista generale; b) vista della zona valliva.	79
Figura 6.2	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.1 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta B; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta B.	80
Figura 6.3	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.1 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta C; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta C.	80
Figura 6.4	Ricostruzione tridimensionale dei depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.1, dove la freccia indica la direzione della portata defluente lungo il canale A.	81
Figura 6.5	Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta B nel canale principale durante la prova 1: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta B; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta B; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.	84
Figura 6.6	Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta C nel canale principale durante la prova 1: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta C; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della	

	canaletta C; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.....	85
Figura 6.7	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.2 ad esperimento concluso per l'intera estensione del canale A.....	86
Figura 6.8	Vista generale dei depositi lungo la canaletta A in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.2 ad esperimento concluso.....	87
Figura 6.9	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.2 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta B; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta B.	87
Figura 6.10	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.2 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta C; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta C.	88
Figura 6.11	Ricostruzione tridimensionale dei depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.2.	88
Figura 6.12	Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta B nel canale principale durante la prova 2: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta B; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta B; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.....	89
Figura 6.13	Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta C nel canale principale durante la prova 2: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta C; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta C; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.....	91
Figura 6.14	Vista generale dei depositi lungo la canaletta A in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.3 ad esperimento concluso.....	93
Figura 6.15	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.3 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta B; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta B.	94

Figura 6.16	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.3 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta C; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta C.....	94
Figura 6.17	Ricostruzione tridimensionale dei depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.3.	95
Figura 6.18	Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta B nel canale principale durante la prova 3: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta B; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta B; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.....	96
Figura 6.19	Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta C nel canale principale durante la prova 3: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta C; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta C; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.....	98
Figura 6.20	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.4 ad esperimento concluso per l'intera estensione del canale A.	99
Figura 6.21	Vista generale dei depositi lungo la canaletta A in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.4 ad esperimento concluso.....	100
Figura 6.22	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.4 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta B; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta B.....	100
Figura 6.23	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.4 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta C; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta C.....	100
Figura 6.24	Ricostruzione tridimensionale dei depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.4.	101
Figura 6.25	Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta B nel canale principale durante la prova 4: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta B; c) del sensore di	

	livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta B; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.....	102
Figura 6.26	Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta C nel canale principale durante la prova 4: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta C; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta C; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.....	104
Figura 6.27	Vista generale dei depositi lungo la canaletta A in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.5 ad esperimento concluso.....	106
Figura 6.28	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.5 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta B; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta B.	106
Figura 6.29	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.5 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta C; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta C.	107
Figura 6.30	Ricostruzione tridimensionale dei depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.5.	107
Figura 6.31	Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta B nel canale principale durante la prova 5: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta B; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta B; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.....	109
Figura 6.32	Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta C nel canale principale durante la prova 5: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta C; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta C; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.....	111

Figura 6.33	Vista generale dei depositi lungo la canaletta A in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.6 ad esperimento concluso.....	112
Figura 6.34	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.6 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta B; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta B.....	113
Figura 6.35	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.6 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta C; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta C.....	113
Figura 6.36	Ricostruzione tridimensionale dei depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.6.	114
Figura 6.37	Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta B nel canale principale durante la prova 6: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta B; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta B; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.....	116
Figura 6.38	Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta C nel canale principale durante la prova 6: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta C; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta C; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.....	117
Figura 6.39	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.7 ad esperimento concluso per l'intera estensione del canale A.	119
Figura 6.40	Ricostruzione tridimensionale dei depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.7.	119
Figura 6.41	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.8 ad esperimento concluso per l'intera estensione del canale A.	120
Figura 6.42	Vista generale dei depositi lungo la canaletta A in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.8 ad esperimento concluso.....	120

Figura 6.43	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.8 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta B; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta B.	121
Figura 6.44	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.8 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta C; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta C.	121
Figura 6.45	Ricostruzione tridimensionale dei depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.8.	122
Figura 6.46	Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta B nel canale principale durante la prova 8: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta B; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta B; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.....	123
Figura 6.47	Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta C nel canale principale durante la prova 8: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta C; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta C; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.....	125
Figura 6.48	Vista generale dei depositi lungo la canaletta A in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.9 ad esperimento concluso.....	126
Figura 6.49	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.9 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta B; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta B.	127
Figura 6.50	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.9 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta C; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta C.	127
Figura 6.51	Ricostruzione tridimensionale dei depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.9.	128
Figura 6.52	Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta B nel canale principale durante la prova 9: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione	

	collocata nella zona valliva della canaletta B; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta B; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.....	130
Figura 6.53	Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta C nel canale principale durante la prova 9: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta C; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta C; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.....	131
Figura 6.54	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.10 ad esperimento concluso per l'intera estensione del canale A.	132
Figura 6.55	Vista generale dei depositi lungo la canaletta A in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.10 ad esperimento concluso.....	133
Figura 6.56	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.10 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta B; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta B.	133
Figura 6.57	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.10 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta C; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta C.	133
Figura 6.58	Ricostruzione tridimensionale dei depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.10.	134
Figura 6.59	Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta B nel canale principale durante la prova 10: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta B; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta B; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.....	136
Figura 6.60	Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta C nel canale principale durante la prova 10: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta C; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del	

	seniore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta C; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.....	138
Figura 6.61	Vista generale dei depositi lungo la canaletta A in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.11 ad esperimento concluso.....	139
Figura 6.62	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.11 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta B; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta B.	140
Figura 6.63	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.11 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta C; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta C.	140
Figura 6.64	Ricostruzione tridimensionale dei depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.11.	141
Figura 6.65	Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta B nel canale principale durante la prova 11: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta B; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta B; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.....	142
Figura 6.66	Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta C nel canale principale durante la prova 11: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta C; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta C; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.....	144
Figura 6.67	Vista generale dei depositi lungo la canaletta A in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.12 ad esperimento concluso.....	146
Figura 6.68	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.12 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta B; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta B.	146
Figura 6.69	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.12 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta C; b)	

	vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta C.	147
Figura 6.70	Ricostruzione tridimensionale dei depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.12.	147
Figura 6.71	Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta B nel canale principale durante la prova 12: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta B; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta B; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.....	149
Figura 6.72	Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta C nel canale principale durante la prova 12: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta C; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta C; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.....	151
Figura 6.73	Vista generale dei depositi lungo la canaletta A in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n. 13 ad esperimento concluso.....	152
Figura 6.74	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.13 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta B; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta B.	153
Figura 6.75	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.13 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta C; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta C.	153
Figura 6.76	Ricostruzione tridimensionale dei depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.13.	154
Figura 6.77	Vista generale dei depositi lungo la canaletta A in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.14 ad esperimento concluso.....	155
Figura 6.78	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.14 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta B; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta B.	156

Figura 6.79	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.14 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta C; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta C.	156
Figura 6.80	Ricostruzione tridimensionale dei depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.14.	157
Figura 6.81	Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta B nel canale principale durante la prova 14: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta B; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta B; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.....	158
Figura 6.82	Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta C nel canale principale durante la prova 14: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta C; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta C; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.....	160
Figura 6.83	Vista generale dei depositi lungo la canaletta A in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.15 ad esperimento concluso.....	161
Figura 6.84	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.15 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta B; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta B.	162
Figura 6.85	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.15 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta C; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta C.	162
Figura 6.86	Ricostruzione tridimensionale dei depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.15.	163
Figura 6.87	Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta B nel canale principale durante la prova 15: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta B; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della	

	canaletta B; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.....	164
Figura 6.88	Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta C nel canale principale durante la prova 15: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta C; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta C; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.....	166
Figura 6.89	Vista generale dei depositi lungo la canaletta A in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.16 ad esperimento concluso.....	167
Figura 6.90	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.16 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta B; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta B.	168
Figura 6.91	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.16 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta C; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta C.	168
Figura 6.92	Ricostruzione tridimensionale dei depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.16.	169
Figura 6.93	Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta B nel canale principale durante la prova 16: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta B; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta B; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.....	170
Figura 6.94	Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta C nel canale principale durante la prova 16: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta C; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta C; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.....	172
Figura 6.95	Vista generale dei depositi lungo la canaletta A in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.17 ad esperimento concluso.....	173

Figura 6.96	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.17 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta B; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta B.	174
Figura 6.97	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.17 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta C; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta C.	174
Figura 6.98	Ricostruzione tridimensionale dei depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.17.	175
Figura 6.99	Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta B nel canale principale durante la prova 17: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta B; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta B; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.....	176
Figura 6.100	Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta C nel canale principale durante la prova 17: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta C; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta C; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.....	178
Figura 6.101	Vista generale dei depositi lungo la canaletta A in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n. 18 ad esperimento concluso.....	179
Figura 6.102	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.18 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta B; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta B.	180
Figura 6.103	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.18 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta C; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta C.	180
Figura 6.104	Ricostruzione tridimensionale dei depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.18.	181
Figura 6.105	Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta B nel canale principale durante la prova 18: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione	

	collocata nella zona valliva della canaletta B; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta B; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.....	182
Figura 6.106	Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta C nel canale principale durante la prova 18: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta C; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta C; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.....	184
Figura 6.107	Vista generale dei depositi lungo la canaletta A in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.19 ad esperimento concluso.....	185
Figura 6.108	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.19 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta B; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta B.	186
Figura 6.109	Depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.19 ad esperimento concluso: a) vista della canaletta C; b) vista dall'alto della canaletta A in corrispondenza della sezione di sbocco della canaletta C.	186
Figura 6.110	Ricostruzione tridimensionale dei depositi in condizioni drenate relativi alla prova sperimentale n.19.	187
Figura 6.111	Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta B nel canale principale durante la prova 19: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta B; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta B; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.....	188
Figura 6.112	Dati acquisiti in prossimità dello sbocco della canaletta C nel canale principale durante la prova 19: a) dalla cella di pressione collocata subito dopo lo sbocco ; b) dalla cella di pressione collocata nella zona valliva della canaletta C; c) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato subito dopo lo sbocco; d) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato zona valliva della canaletta C; e) del sensore di livello ad ultrasuoni collocato lungo il canale A a 75cm a valle dello sbocco.....	190

Figura 7.1	Confronto dei segnali acquisiti per esperimenti caratterizzati da angolo di confluenza 60° , tempistica di innesco monte-valle e pendenze 17° (EXP1) e 15° (EXP11) da: trasduttore di pressione posto lungo il canale A in prossimità dello sbocco del canale C; b) trasduttore di pressione posto lungo il canale C in prossimità dello sbocco nel canale A; c) sensore di livello posto lungo il canale A in prossimità dello sbocco del canale del canale C; d) sensore di livello posto lungo il canale C in prossimità dello sbocco nel canale A; e) sensore di livello posto lungo il canale A a 75cm circa dalla sezione di sbocco del canale C.	194
Figura 7.2	Confronto dei segnali acquisiti per esperimenti caratterizzati da pendenza dei canali B e C 17° , condizione di innesco monte-valle, angolo di confluenza rispettivamente 60° (EXP1), 50° (EXP4), 90° (EXP16) da: a) trasduttore di pressione posto lungo il canale A in prossimità dello sbocco del canale C; b) trasduttore di pressione posto lungo il canale C in prossimità dello sbocco nel canale A; c) sensore di livello posto lungo il canale A in prossimità dello sbocco del canale C; d) sensore di livello posto lungo il canale C in prossimità dello sbocco nel canale A; e) sensore di livello posto lungo il canale A a 75cm circa dalla sezione di sbocco del canale C.	195
Figura 7.3	Confronto dei profili relativi a esperimenti con pendenza del canale B e del canale C 17° , angolo di confluenza 50° al variare della condizione di innesco rilevati da sensori di livello posti: a) lungo il canale A nella sezione in prossimità dello sbocco del canale C; b) lungo il canale A nella a 75 cm a valle dalla sezione di sbocco del canale C; c) lungo il canale C in prossimità dello sbocco nel canale A.	197
Figura 7.4	Rappresentazioni in pianta del rilievo del deposito acquisito a fine esperimento, dove sono indicate le distanze tra l'asse mediano degli sbocchi e l'inizio e la fine del deposito di monte (x_{BM} e x_{BV}), le distanze tra l'asse mediano degli sbocchi e l'inizio e la fine del deposito di valle (x_{CM} e x_{CV}), la massima estensione trasversale del deposito di monte (y_{Bmax}), la massima estensione trasversale del deposito di valle (y_{Cmax}), e la posizione del centro di massa.	198
Figura 7.5	Profili longitudinali del deposito di colata rilevati a fine esperimenti per l'intero set di prove condotte per le seguenti sezioni indicate in base alla distanza dalla parete in cui sono collocate le confluenze: a) sezione a 45 cm; b) sezione a 35 cm; c) sezione a 25 cm; d) sezione a 15 cm; e) sezione a 5 cm.	202
Figura 7.6	Confronto tra profili longitudinali del deposito nel canale A acquisiti lungo la sezione a 25 cm al variare dell'angolo di	

	confluenza dei canali B e C con pendenza delle canalette laterali pari a 17° e condizione di innesco rispettivamente: a) monte - valle; b) valle - monte; c) contemporaneo.	203
Figura 7.7	Confronto tra andamenti dei profili longitudinali del deposito nel canale A acquisiti lungo la sezione a 25 cm al variare della pendenza 17° (EXP1) 15° (exp11) con condizione di innesco costante (monte-valle) e angolo di confluenza costante rispettivamente: a) 60°; b) 90°.....	204
Figura 7.8	Andamento dei profili longitudinali di deposito nel canale A rilevati lungo la sezione posta a 25 cm dalla parete dove sono le confluenze, costruito al variare delle differenti condizioni di innesco monte-valle (B->C), valle-monte (C->B), contemporaneo (B=C) ma mantenendo costanti pendenza delle canalette laterali (17°) e angolo di confluenza rispettivamente pari a: a) 50°; b) 60°; c) 90°.....	205
Figura 7.9	Confronto al variare dell'angolo di confluenza (50°-60°-90°) tra profili trasversali rilevati lungo la sezione dove risulta collocato il centro di massa rispettivamente per esperimenti con pendenza dei canali B e C costante 17° e condizione di innesco rispettivamente: a) innesco monte-valle; b) innesco valle-monte; c) innesco contemporaneo.	206
Figura 7.10	Confronto al variare dell'angolo di confluenza (50°-60°-90°) tra profili trasversali rilevati lungo la sezione dove risulta collocato il centro di massa rispettivamente per esperimenti con pendenza dei canali B e C costante 15° e condizione di innesco rispettivamente: a) innesco monte-valle; b) innesco valle-monte; c) innesco contemporaneo.	207
Figura 7.11	Volumi di deposito rilevati alla fine di ogni esperimento in funzione dell'angolo di confluenza.....	208
Figura 7.12	Volumi di deposito rilevati a fine esecuzione di ogni esperimento in funzione della pendenza dei canali B e C.....	208
Figura 7.13	Posizionamento del centro di massa rispettivamente lungo l'asse longitudinale del canale A (asse-x), l'asse trasversale del canale A (asse-y) e l'asse ortogonale (asse-z).	209
Figura 7.14	Andamento dei parametri caratteristici del deposito al variare dell'angolo di confluenza 50° - 60° - 90° per esperimenti condotti con tempistica di innesco costante (monte-valle) e pendenza dei canali B e C pari a 17° rispettivamente in funzione di: a) volume di deposito; b) posizione del centro di massa del deposito lungo l'asse longitudinale del canale A (asse-x); c) posizione del centro di massa del deposito lungo l'asse trasversale del canale A (asse-y); d) fattore di forma del	

	deposito di monte allo sbocco del canale B; e) fattore di forma del deposito di valle allo sbocco del canale C.	210
Figura 7.15	Andamento dei parametri caratteristici del deposito al variare dell'angolo di confluenza 50° - 60° - 90° per esperimenti condotti con tempistica di innesco costante (monte-valle) e pendenza dei canali B e C pari a 15° rispettivamente in funzione di: a) volume di deposito; b) posizione del centro di massa del deposito lungo l'asse longitudinale del canale A (asse-x); c) posizione del centro di massa del deposito lungo l'asse trasversale del canale A (asse-y); d) fattore di forma del deposito di monte allo sbocco del canale B; e) fattore di forma del deposito di valle allo sbocco del canale C.	211
Figura 7.16	Posizione del centro di massa al variare dell'angolo di confluenza 50° - 60° - 90° relativo al solo deposito in corrispondenza dello sbocco del canale B per esperimenti condotti con pendenza dei canali B e C pari a 17° e tempistica di innesco costante monte-valle, rappresentato nelle seguenti tipologie : a) angolo di confluenza - asse longitudinale del canale A (asse-x); b) angolo di confluenza - asse trasversale del canale A (asse-y); c) - asse longitudinale del canale A (asse-x) - asse trasversale del canale A (asse-y).....	213
Figura 7.17	Confronto al variare dell'angolo di confluenza 50° - 60° -90° per esperimenti condotti con tempistica di innesco costante (monte-valle) e pendenza dei canali B e C rispettivamente: a) 17°; b) 15°	214
Figura 7.18	Posizione del centro di massa al variare dell'angolo di confluenza 50° - 60° - 90° relativo al solo deposito in corrispondenza dello sbocco del canale B per esperimenti condotti con pendenza dei canali B e C pari a 15° e tempistica di innesco costante monte-valle, rappresentato nelle seguenti tipologie : a) angolo di confluenza - asse longitudinale del canale A (asse-x); b)angolo di confluenza - asse trasversale del canale A (asse-y); c) - asse longitudinale del canale A (asse-x) - asse trasversale del canale A (asse-y).....	215
Figura 7.19	Quadro sinottico dei risultati scaturiti dalle indagini di laboratorio.	216
Figura A.1	Diagramma dei profili di velocità nella direzione della corrente degli esperimenti 1C h= 32.5 Q _c = 40,35 l/s e U _c =0.05 cm/s, 1W h= 33.3 H= 2.62 cm T= 0,85 s 1WC h=33.3 Q _{wc} = 48,04 l/s H = 2,68 cm T= 0,85 s Errore. Il segnalibro non è definito.	

- Figura A.2** Diagramma dei profili di velocità nella direzione delle onde degli esperimenti **1C** $h=32.5$ $Q_c=40,35$ l/s e $U_c=0.05$ cm/s, **1W** $h=33.3$ $H=2.62$ cm $T=0,85$ s **1WC** $h=33.3$ $Q_{wc}=48,04$ l/s $H=2,68$ cm $T=0,85$ s**Errore. Il segnalibro non è definito.**
- Figura A.3** Diagramma dei profili di velocità nella direzione della corrente degli esperimenti **3C** $h=32$ $Q_c=48,92$ l/s e $U_c=0.06$ cm/s, **2W** $h=33.6$ $H=3.98$ cm $T=0,85$ s **6WC** $h=33.5$ $Q_{wc}=42,86$ l/s $H=3,78$ cm $T=0,85$ s**Errore. Il segnalibro non è definito.**
- Figura A.4** Diagramma dei profili di velocità nella direzione delle onde degli esperimenti **3C** $h=32$ $Q_c=48,92$ l/s e $U_c=0.06$ cm/s, **2W** $h=33.6$ $H=3.98$ cm $T=0,85$ s **6WC** $h=33.5$ $Q_{wc}=42,86$ l/s $H=3,78$ cm $T=0,85$ s.....**Errore. Il segnalibro non è definito.**
- Figura A.5** Diagramma dei profili di velocità nella direzione della corrente degli esperimenti **2C** $h=32.6$ $Q_c=46,29$ l/s e $U_c=0.06$ cm/s, **3W** $h=32.6$ $H=4,02$ cm $T=0,91$ s **8WC** $h=32.6$ $Q_{wc}=46,29$ l/s $H=4,10$ cm $T=0,91$ s**Errore. Il segnalibro non è definito.**

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 4.I	Valori dei livelli di colata detritica per le diverse zone, confrontando i dati relativi ai vari scenari di evento simulati con i dati di campo (Ucosich).....	53
Tabella 4.II	Valori di massimo livello osservato durante l'evento (h_{max}) e i valori degli spessori di materiale sedimentato della colata di detrito (dz_b), acquisiti sia tramite indagine in situ che tramite modellazione con il codice FLO- 2D e il codice TRENT-2D, in riferimento ai punti nei quali tali informazioni sono disponibili. .	60
Tabella 5.I	Principali caratteristiche sedimentologiche del materiale impiegato per la frazione solida della colata.	70
Tabella 6.I	Parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e parametri idraulici adottati per la campagna sperimentale: numero d'ordine della prova, inclinazione (β_A) e portata fluente (Q_A) nella canaletta principale, inclinazione (β) e angolo di confluenza (α) delle canalette laterali e gli istanti di innesco (t_0) delle colate, portata di innesco nelle canalette laterali.....	78
Tabella 6.II	Parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e parametri idraulici adottati nell'esperimento 1: numero d'ordine della prova, portata fluente nella canaletta principale, angolo di confluenza delle canalette laterali e istanti di innesco delle colate e portata di innesco nelle canalette laterali.....	79
Tabella 6.III	Parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e parametri idraulici adottati nell'esperimento 2: numero d'ordine della prova, portata fluente nella canaletta principale, angolo di confluenza delle canalette laterali e istanti di innesco delle colate e portata di innesco nelle canalette laterali.....	86
Tabella 6.IV	Parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e parametri idraulici adottati nell'esperimento 3: numero d'ordine della prova, portata fluente nella canaletta principale, angolo di confluenza delle canalette laterali e istanti di innesco delle colate e portata di innesco nelle canalette laterali.....	93
Tabella 6.V	Parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e parametri idraulici adottati nell'esperimento 4: numero d'ordine della prova, portata fluente nella canaletta	

	principale, angolo di confluenza delle canalette laterali e istanti di innesco delle colate e portata di innesco nelle canalette laterali.	99
Tabella 6.VI	Parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e parametri idraulici adottati nell'esperimento 5: numero d'ordine della prova, portata fluente nella canaletta principale, angolo di confluenza delle canalette laterali e istanti di innesco delle colate e portata di innesco nelle canalette laterali.	105
Tabella 6.VII	Parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e parametri idraulici adottati nell'esperimento 6: numero d'ordine della prova, portata fluente nella canaletta principale, angolo di confluenza delle canalette laterali e istanti di innesco delle colate e portata di innesco nelle canalette laterali.	112
Tabella 6.VIII	Parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e parametri idraulici adottati nell'esperimento 7: numero d'ordine della prova, portata fluente nella canaletta principale, angolo di confluenza delle canalette laterali e istanti di innesco delle colate e portata di innesco nelle canalette laterali.	118
Tabella 6.IX	Parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e parametri idraulici adottati nell'esperimento 8: numero d'ordine della prova, portata fluente nella canaletta principale, angolo di confluenza delle canalette laterali e istanti di innesco delle colate e portata di innesco nelle canalette laterali.	120
Tabella 6.X	Parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e parametri idraulici adottati nell'esperimento 9: numero d'ordine della prova, portata fluente nella canaletta principale, angolo di confluenza delle canalette laterali e istanti di innesco delle colate e portata di innesco nelle canalette laterali.	126
Tabella 6.XI	Parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e parametri idraulici adottati nell'esperimento 10: numero d'ordine della prova, portata fluente nella canaletta principale, angolo di confluenza delle canalette laterali e istanti di innesco delle colate e portata di innesco nelle canalette laterali.	132
Tabella 6.XII	Parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e parametri idraulici adottati nell'esperimento 11: numero d'ordine della prova, portata fluente nella canaletta principale, angolo di confluenza delle canalette laterali e	

	istanti di innesco delle colate e portata di innesco nelle canalette laterali.....	139
Tabella 6.XIII	Parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e parametri idraulici adottati nell'esperimento 12: numero d'ordine della prova, portata fluente nella canaletta principale, angolo di confluenza delle canalette laterali e istanti di innesco delle colate e portata di innesco nelle canalette laterali.....	145
Tabella 6.XIV	Parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e parametri idraulici adottati nell'esperimento 13: numero d'ordine della prova, portata fluente nella canaletta principale, angolo di confluenza delle canalette laterali e istanti di innesco delle colate e portata di innesco nelle canalette laterali.....	152
Tabella 6.XV	Parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e parametri idraulici adottati nell'esperimento 14: numero d'ordine della prova, portata fluente nella canaletta principale, angolo di confluenza delle canalette laterali e istanti di innesco delle colate e portata di innesco nelle canalette laterali.....	154
Tabella 6.XVI	Parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e parametri idraulici adottati nell'esperimento 15: numero d'ordine della prova, portata fluente nella canaletta principale, angolo di confluenza delle canalette laterali e istanti di innesco delle colate e portata di innesco nelle canalette laterali.....	161
Tabella 6.XVII	Parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e parametri idraulici adottati nell'esperimento 16: numero d'ordine della prova, portata fluente nella canaletta principale, angolo di confluenza delle canalette laterali e istanti di innesco delle colate e portata di innesco nelle canalette laterali.....	167
Tabella 6.XVIII	Parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e parametri idraulici adottati nell'esperimento 17: numero d'ordine della prova, portata fluente nella canaletta principale, angolo di confluenza delle canalette laterali e istanti di innesco delle colate e portata di innesco nelle canalette laterali.....	173
Tabella 6.XIX	Parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e parametri idraulici adottati nell'esperimento 18: numero d'ordine della prova, portata fluente nella canaletta principale, angolo di confluenza delle canalette laterali e	

	istanti di innesco delle colate e portata di innesco nelle canalette laterali.	179
Tabella 6.XX	Parametri relativi alla configurazione geometrica dell'apparato strumentale e parametri idraulici adottati nell'esperimento 19: numero d'ordine della prova, portata fluente nella canaletta principale, angolo di confluenza delle canalette laterali e istanti di innesco delle colate e portata di innesco nelle canalette laterali.	185
Tabella 7.I	Valori di differenti parametri calcolati per ogni esperimento: volume del deposito lungo il canale A (V_{dep}); posizione del centro di massa del deposito complessivo (X_G, Y_G, Z_G); posizione del centro di massa del deposito allo sbocco della canaletta B (X_{GB}, Y_{GB}, Z_{GB}); fattore di forma del singolo deposito, cioè relativo al deposito allo sbocco del canale B e del canale C (F_B e F_C)	199

BIBLIOGRAFIA**A**

- Ancey, C., 2001. Debris flow and related phenomena. N.J. Balmforth and A. Provenzale (Eds.): LNP 582, pp. 528–547, 2001. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2001.
- Armanini, A., Fraccarollo, L., Rosatti, G., 2009. Two-dimensional simulation of debris flows in erodible channels *Computers & Geosciences* 35 993–1006.

B

- Bagnold, R.A., 1954. Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. *Proceedings of the Royal Society of London A* 225: 49-63.
- Bertolo, P., Bottino, G., 2008. Debris-flow event in the Frangerello Stream-Susa Valley (Italy) – Calibration of numerical models for the back analysis of the 16 October, 2000 rainstorm, *Landslides* (2008) 5:19-30.
- Bianco, G., Franzini, L., 2000. Estimation of debris-flow volumes from storm events. *Debris-flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*. Wieczorek & Naeser (eds), 2000 Balkema, Rotterdam, ISBN 90 5809 149 X, 441-448.
- Bottino, G., Crivellari, R., Mandrone, G., 1996. Analisi di colate detritiche connesse con l'evento alluvionale del 5-6 novembre 1994 nell'Anfiteatro Morenico di Ivrea. *Atti del Convegno "Rischio idrogeologico, opere di difesa ed uso del territorio nel Canavese"*, Ivrea 8-9 Maggio 1998, 35-45.
- Buser, O., Frutiger, H., 1980. Observed maximum run-out distance of snow avalanches and determination of the friction coefficients μ and ξ , *J. Glaciol.* 26 pp. 121–130.[51] D.

C

- Caine, N., 1980. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. *Geogr Ann* A62: 23–27.
- Calvetti, F., 2010. Modellazione numerica dell'innescò e dell'espandimento dei fenomeni franosi. *Il Giornale dell'Ingegnere. Focus – aspetti idrogeologici e difesa del territorio*. No.6 – 1 Aprile 2010, pag.7-8.
- Cannon, S.,H., Ellen S.,D., 1985. Rainfall conditions for abundant debris avalanches, San Francisco Bay region, California. *Calif Geol* 38: 267–272.
- Cao, R., et al., 1983. The Law of hydraulic resistance in density current with hyperconcentration. *Proc, Second Int. Symposium on River Sedimentation*, 65-79.
- Ceriani, M., Lauzi, S., Padovan, N., 1992. Rainfall and landslides in the Alpine area of Lombardia Region, central Alps, Italy. In: *Interpraevent Int. Symposium*. Bern: 2: 9–20.

- Chen, C., L., 1988. Generalized viscoplastic modelling of debris flow, *J. Hyd. Res., ASCE*, 114(3).
- Chleborad, A.,F., 2003. Preliminary Evaluation of a Precipitation Threshold for Anticipating the Occurrence of Landslides in the Seattle, Washington, Area, US Geological Survey Open-File Report 03-463.
- Costa, J., E., and Williams, G., P., 1984. Debris-flow dynamics (video tape): U.S. Geological Survey Open-File Report 84-606, 22 min.
- Coussot, P., e Piau, J.,M., 1995a. A large-scale field coaxial cylinders rheometer for the study of the rheology of natural coarse suspensions. *J. Rheol.*, 39, pp. 105-125.
- Coussot, P., e Piau, J.,M., 1995b. The effects of an addition of force-free particles on the rheological properties of fine suspensions. *Can. Geotech. J.*, 32, pp. 263-270.
- Coussot, P., Laigle, D., Arattano, M., Deganutti, A., Marchi, L., 1988. Direct determination of rheological characteristics of debris flow. *Journal of Hydraulic Engineering*. August 1998, Vol. 124, n.8, pp. 865-868.
- Crosta, G.,B., Frattini, P., 2001. Rainfall thresholds for triggering soil slips and debris flow. In: *Proceedings 2ndEGS Plinius Conference on Mediterranean Storms* (Mugnai, A., Guzzetti, F., Roth., G., eds). Siena: pp. 463–487.
- Crosta, G.,B., Frattini., P., 2003. Distributed modelling of shallow landslides triggered by intense rainfall. *Nat HazardEarth Sys Sci* 3(1-2): pp.81–93.
- Crozier, M.,J., 1999. Prediction of rainfall-triggered landslides: a test of the antecedent water status model. *Earth Surf Proc Land* 24: pp.825–833.
- Crozier, M.,J., Eyles, R.,J., 1980. Assessing the probability of rapid mass movement. In: *Proceedings of 3rdAustralia-New Zealand Conference on Geomechanics* (Technical Groups, eds). Wellington: NewZealand Institution of Engineers, 6: pp. 247–251.

D

- D'Agostino, V., Cerato, M., Coali, R., 1996. Il trasporto solido di eventi estremi nei torrenti del Trentino Orientale. *Int. Symp. Interpretavent 1996, Garmisch-Partenkirchen, Tagungspublikation, Band 1*, pp. 377-386.
- Dai, J., et al., 1980. An experimental study of slurry transport in pipes. *Proc, Int. Symposium on River Sedimentation*, pp. 195-204 (in Chinese).

F

- Fink, J., H., Malin, M., C., D'Alli, R., E., and Greeley, R., 1981. Rheological properties of mudflows associated with the spring 1980 eruptions of Mount St. Helens volcano, Washington: *Geophysical Research Letters*, v. 8, pp. 43–46.

Fraccarollo, L., Capart, H., Zech, Y., 2003. A Godunov method for the computation of erosional shallow water transient. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 41(9), pp. 951-976.

G

Ghirlardi, P., Natale, L., Savi, F., 2001. Modeling Debris Flow Propagation and deposition. *Phys. Chem. Earth (C)*, Vol. 26, No. 9, pp. 651-656.

Glade, T., Crozier, M.,J., Smith, P., 2000. Applying probability determination to refine landslide-triggering rainfall thresholds using an empirical "Antecedent Daily Rainfall Model". *Pure Appl Geophys*,157(6/8): pp. 1059–1079.

Govier, G., W., and Aziz, K., 1982. *The flow of complex mixtures in pipes*. Krieger Publishing Co., Melbourne, Fla.

Green, W.,H., Ampt, G., 1911. Studies of soil physics. Part I. The flow of air and water through soils. *J Agr Sci* 4: pp. 1–24.

Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., Stark, C.,P., 2007. Rainfall Thresholds For The Initiation Of Landslides In Central And Southern Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*, Volume 98, Issue 3-4, pp. 239-267.

H

Herschel, W., H., and Bulkley, R., 1926. Measurement of consistency as applied to rubber-benzene solutions. *A.S.T.M. Proc*, 26 pp. 621.

Higgins, J., D., et al., 1983. *The mechanics of mud flow*. State of Washington Water Research Center Report No. 51, Pullman, Wash.

Hou, H., and Yang, X., 1983. Effect of fine sediment on the drag reduction in muddy flow. *Proc, Second Int. Symposium on River Sedimentation*, pp. 67-80 (in Chinese).

Hungr, O., Morgenstern, N.,R., 1984. Experiments in high velocity open channel flow of granular materials. *Geotechnique* 34: 405-413. Discussion and Reply, 35: pp. 383-385.

Hungr, O., Evans, S.,G., 1996. Rock avalanche runout prediction using a dynamic model. *Landslide, Senneset (ed.) 1996 Balkema, Rotterdam, ISBN90 5454108185*.

Hungr, O., Evans, S.,G., 1996. Rock avalanche runout prediction using a dynamic model. *Landslide, Senneset (ed.) 1996 Balkema, Rotterdam, ISBN90 5454108185*.

I

Iverson, R., M., 1985. A constitutive equation for mass-movement behavior : *journal of Geology*, v.93, no.2, pp.143-160.

Iverson, R.,M., 2003. The debris-flow rheology myth, in: C.L. Chen, D. Rickenmann (Eds.), *Debris flow Mechanics and Mitigation Conference*, Mills Press, Davos, pp. 303–314.

- Iverson, R.,M., 1997. The physics of debris flows, *Rev. Geophys.* 35 pp. 245–296.
- Iverson, R.,M., 2000. Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resour Res* 36(7): pp. 1897–1910.

J

- Johnson, A.,M., 1984. Debris flow. In *Slope Instability*, ed. D. Brunsten, DB Prior, pp.257-361. New York : Wiley.
- Johnson, A.,M., 1965. A model for debris flow. Ph.D. dissertation, The Pennsylvania State University.
- Julien, P., Y., and O'Brien, J., S., 1987. Discussion of Mountain torrent erosion. Sediment transport in gravel-bed rivers. John Wiley & Sons, New York, N.Y., pp.537-539.

K

- Kaitna, R., Rickenmann, D., Schatzmann, M., 2007. Experimental study on rheologic behaviour of debris-flow material. *Acta Geotechnica*, 2 (2007), pp. 71–85.
- Komamura, F., & Huang, R., J., 1974. New rheological model for soil behaviour. *J. Geotech. Engng Div. ASCE* 100 (GT7).

L

- Locat, J., 1997. Normalized rheological behaviour of fine muds and their properties in a pseudoplastic regime. *Debris-flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*. New York: American Society of Civil Engineers. pp. 260-269.
- Lumb, P., 1975 Slope failure in Hong Kong. *Q J Eng Geol* 8: pp. 31–65.

M

- Major, J.,J., & Pierson, T.,C., 1992. Debris flow rheology: experimental analysis of fine-grained slurries. *Water Resources Research* 28: pp. 841-857.
- Malet, J.,P., Remaître, A., Maquaire, O., Ancy, C., Locat, J., 2003. Flow susceptibility of heterogeneous marly formations. Implications for torrent hazard control in the Barcelonnette basin (Alpes-de-Haute-Provence, France) In 3rd International Conference on Debris-Flow Hazard Mitigation: Prediction and Assessment, Rickenmann D, Chen CL (eds). Millpress: Rotterdam; pp.351–362.
- Marchi, L., Tecca, P.,R., 1996. Hill-slope debris flows in the Dolomites: characteristics and associated risk *Int. Symp. Interpraevent 1996 – Garmisch- Partenkirchen Tagungspublikation*, Band 3, pp.83-92.
- Martinelli, M., Lang, T.,E., Mears, A.,I., 1980. Calculations of avalanche friction coefficients from field data. *Journal of Glaciology*, Vol.26, No.94, pp. 109-119.
- Melton, M.,A., 1965. The geomorphic and paleoclimatic significance of alluvial deposits in southern Arizona. *Journal of Geology* 73: pp. 1–38.

Montgomery, D.,R., Dietrich, W.,E., 1994. A physically based model for the topographic control of shallowlandsliding. *Water Resour Res* 30(4): pp.1153–1171.

Q

O'Brien, J., S., and Julien, P., Y., 1985. Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediment flows. *Proc., ASCE Specialty Conf. on the Delineation of Landslides, Flash Floods and Debris Flow Hazards in Utah*, Utah Water Research Lab., Univ. of Utah at Logan, Utah, pp. 260-279.

O'Brien, J., S., 1986. Physical processes, rheology and modeling of mudflows, PhD thesis, Colorado State University, Fort Collins.

O'Brien, J., and Julien, P., 1988. Laboratory Analysis of Mudflow Properties. *Hydraul, J., Eng.*, 114(8), pp. 877–887. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429 (1988) 114:8 (877).

O'Brien, J., S., Julien, P.,Y., and Fullerton, W.,T., 1993. Two dimensional water flood and mudflow simulation," *Hydr., J., Engng.*, ASCE, 119(2), pp. 244-261.

Q

Qian, Y., et al., 1980. Basic characteristics of flow with hyperconcentration of sediment. *Proc. Int. Symposium on River Sedimentation, Beijing, China, Vol. 1*, pp.175-184 (in Chinese).

R

Reiner, M., 1960. *Deformation, Strain and Flow: An Elementary Introduction to Rheology*. New York: IntersciencePublishers.

Revellino P., Hungr O., Guadagno F.M., Evans S.G. 2004. Velocity and runoff simulation of destructive debris flows and debris avalanches in pyroclastic deposits, Campania Region, Italy. *Environmental Geology* 45, pp. 295-311.

Rickenmann, D., 2003. *Debris Flow Mechanics and Mitigation Conference*, Mills Press, Davos, pp. 503–514.

S

Salm, B., Burkard, A., and Gubler, H., 1990. Berechnung von Fliesslawinen. *Eidg. Inst. Schnee- Lawinenforsch. Mitt.* 47.

Salvucci, G.,D., Entekabi, D., 1994. Explicit expressions for Green-Ampt (Delta function diffusivity) infiltration rate and cumulative storage. *Water Resour Res* 30: 2661–2663 Philip JR (1954) An infiltration equation with physical significance. *Soil Sci* 77(1): pp. 153–157.

Schaerer, P., A., 1975. Friction coefficients and speed of flowing avalanches. [Union Giodisique et Giophysique Internationale. Association Internationale des Sciences Hydrologiques. Commission des Neiges et Glaces.] *Symposium. Micanique de la neige. Actes du colloque de Grindelwald, avril 1974*, p. 425-32. (IAHS-AISH Publication No. 114.

- Schaerer, P., A., and Salway, A., A., 1980. Seismic and impact-pressure monitoring of flowing avalanches. *J. Glaciol.*, 26(94), pp. 179-187.
- Sosio, R., Crosta, G., B., Frattini, P., Valbuzzi, E., 2006. Caratterizzazione reologica e modellazione numerica di un Debris flow in ambiente alpino". *Giornale di Geologia Applicata* 3; pp. 263-268.
- Stancanelli, L.,M., Bovolin, V., Foti, E., 2011. Application of a dilatant - viscous plastic debris flow model in a real complex situation. *River, Coastal and Estuarine Morphodynamics: RCEM 2011*. Beijing 6-8th September .
- Street, N., 1958. Viscosity of clay suspensions. *World Oil*, 147(7), pp. 151-156.

T

- Takahashi, T., 1978. Mechanical characteristics of debris flow, *Journal of Hydraulic Division ASCE* 104(8), 1153-1169.
- Takahashi, T., and Yoshida, H., 1979: Study on the deposition of debris flow (1) – Deposition due to abrupt change of bed slope. *Annuals, DPRI*, 22B-2, pp. 315–328 (in Japanese).
- Takahashi, T., 1980. Debris flow on prismatic open channel," *J.Hydr. Div., ASCE*, 106(3), pp. 381-396.
- Takahashi, T., 1981. Debris flow. *Annu. Rev.Fluid Mech.* 13:57–77
- Takahashi, T., 1987. High velocity flow in steep erodible channels. In: *Proceeding of 22nd Congress of IAHR, Lausanne*, pp. 42-53.
- Takahashi, T. 1991. *Debris Flow*. Rotterdam: Balkema.
- Thomas, D., G., 1963. Non-Newtonian suspensions. Part I: physical properties and laminar transport characteristics. *Ind. Eng. Chem.*, 55(11), pp.18-29.
- Trent2D, User's, Manual, 2011. Available at: www.simidra.com/pdf/Manuale_Trent2D_versione1.84.pdf.

V

- Voellmy, A., 1955. *Über die ZersWungkraft vonLawinen*. Schweiz. Bauztg., pp. 73, 159-165, 212-217, 246-249, 280-285.

W

- Whipple, K., X., 1994. Debris flow fans: process and form. Ph.D. thesis, University of Washington.
- Wieczorek, G.,F., 1987. Effect of rainfall intensity and duration on debris flows in central Santa CruzMountains. In: *Debris flow/avalanches: process, recognition, and mitigation* (Costa JE, Wieczorek GF,eds). Geological Society of America, *Reviews in Engineering Geology*, 7: 93–104.

Wilson, R.,C., 1989. Rainstorms, pore pressures, and debris flows: a theoretical framework. In: Landslides in a semi-arid environment (Morton DM, Sadler PM, eds). California: Publications of the Inland Geological Society, 2: pp. 101–117.

Wilson, R.,C., Wiczorek, G.,F., 1995 Rainfall thresholds for the initiation of debris flow at La Honda, California. *Environ Eng Geosci* 1(1): pp. 11–27.

Y

Yano, K., & Daido, A., 1965. Fundamental study on mud-flow. *Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute (Japan)* 14 part 2: pp. 69-83.

