



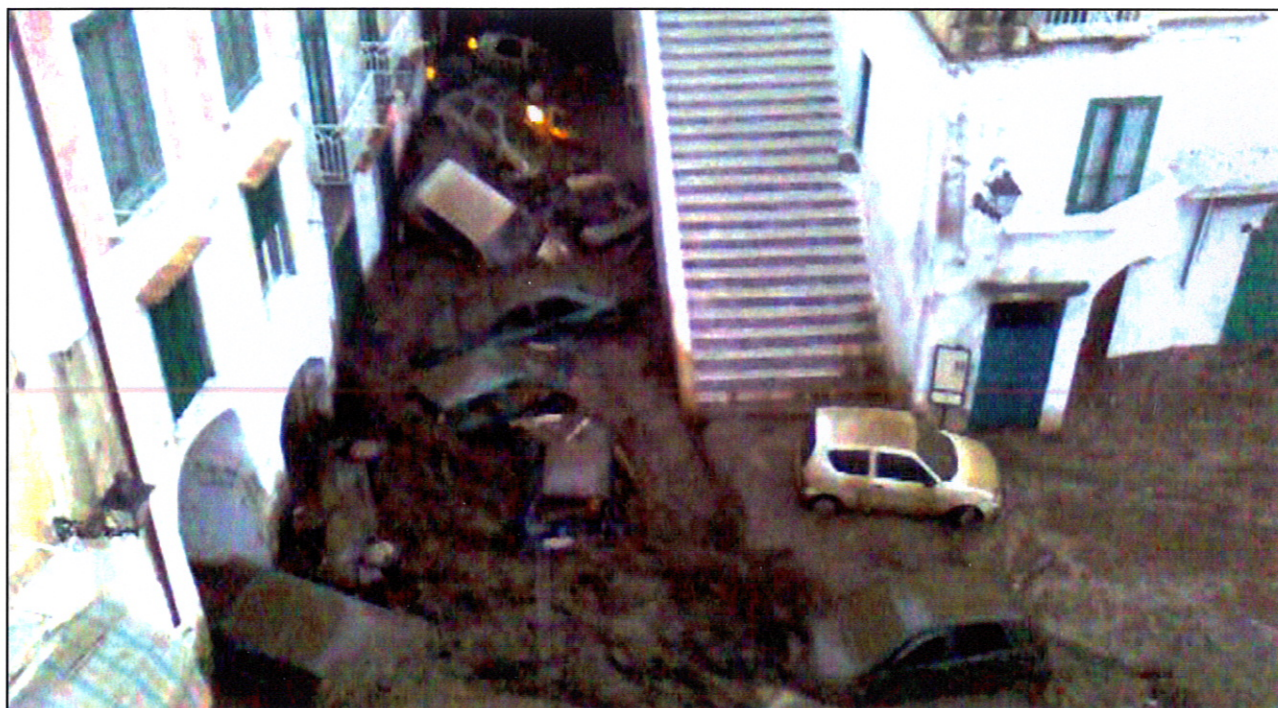
**C.U.G.R.I.**  
Consorzio inter-Universitario  
per la Previsione e Prevenzione dei Grandi Rischi  
Università di Salerno - Università di Napoli "Federico II"



**IMPRINTS** 

# Studio idraulico dell'evento alluvionale avvenuto ad Atrani (SA) il 9 settembre 2010

## *PARTE II: simulazioni tridimensionali*



*Vittorio Bovolín & Mario Vito Picciotti*



*Università degli Studi di Salerno  
Dipartimento di Ingegneria Civile*

**Fisciano**

**Gennaio 2012**





# **Studio idraulico dell'evento alluvionale avvenuto ad Atrani (SA) il 9 settembre 2010**

## ***PARTE II: simulazioni tridimensionali***

***Vittorio Bovolín & Mario Vito Picciotti***

*Università degli Studi di Salerno  
Dipartimento di Ingegneria Civile*

**Fisciano**

**Gennaio 2012**





Nel tardo pomeriggio del 9 settembre 2010 la Campania è stata interessata dal passaggio di una perturbazione caratterizzata da intense precipitazioni, che, all'incirca tra le 18:30 e le 19:30, hanno provocato l'allagamento di alcune porzioni dell'abitato di Atrani (SA).

La previsione e prevenzione degli eventi alluvionali in bacini di piccole dimensioni risultano particolarmente complicate in particolare per la ridotta durata temporale del fenomeno.

L'Unione Europea consapevole di tali problematiche ha finanziato, nell'ambito del VII Programma Quadro, un progetto di ricerca denominato IMPRINTS finalizzato all'approfondimento delle tematiche relative alla mitigazione dei fenomeni di flash floods e colate detritiche

Il Centro interUniversitario per la prevenzione dei Grandi Rischi (CUGRI), come entità tecnico scientifica, e l'Autorità di Bacino del Destra Sele, come entità territoriale, sono i componenti italiani di tale progetto. Il bacino del torrente Dragone, interessato dall'evento del 9 settembre 2010, è adiacente al bacino del torrente Sambuco che è il bacino campione del progetto IMPRINTS. E' sembrato pertanto opportuno approfondire gli aspetti idraulici relativi all'evento avvenuto nel bacino del Torrente Dragone. Lo studio si compone di due parti:

- PARTE I: Ricostruzione dell'evento
- PARTE II: Simulazioni tridimensionali

La PARTE I contiene le analisi e le attività finalizzate allo studio dell'evento con particolare attenzione alla ricostruzione dell'andamento temporale delle portate che sono defluite nel corso dell'evento stesso.

La PARTE II contiene gli approfondimenti effettuati, mediante simulazioni tridimensionali, su quattro aspetti specifici dell'evento.

L'utilità dei dati raccolti risiede non solo nel valore intrinseco delle informazioni raccolte, ma anche nel fatto che vengono messi a disposizione gli elementi necessari per ulteriori approfondimenti di tipo idraulico ed idrologico.

*La presente pubblicazione rispecchia le posizioni degli Autori. Né il CUGRI né la Commissione Europea è responsabile dell'uso che potrebbe essere fatto delle informazioni in esso contenute*

---





## **Studio idraulico dell'evento alluvione avvenuto ad Atrani (SA) il 9 settembre 2010**

### ***PARTE II: simulazioni tridimensionali***

***Vittorio Bovolín & Mario Vito Picciotti***

*Università degli Studi di Salerno*

*Dipartimento di Ingegneria Civile*

Nella prima parte del presente studio è stata effettuata la ricostruzione dell'evento alluvionale verificatosi ad Atrani (SA) il 9 settembre 2010. Tale ricostruzione ha permesso di definire, tra l'altro, l'andamento temporale delle portate che sono defluite all'interno del tratto tombato del torrente Dragone che attraversa l'abitato di Atrani e lungo la sovrastante via dei Dogi.

Nella prima parte dello studio sono emersi alcuni aspetti che sono sembrati meritevoli di ulteriori approfondimenti mediante l'impiego di simulazioni di tipo tridimensionale. Appare opportuno precisare che con il termine tridimensionale si fa riferimento non solo a situazioni geometriche sviluppate in tre dimensioni, ma, più in generale, ci si riferisce a tutte quelle situazioni per le quali non sia ritenuta soddisfacente una modellazione basata sulla classica approssimazione idrostatica.

In particolare sono stati identificati i seguenti aspetti:

- effetto delle travi di sostegno della copertura dell'alveo sulle perdite di carico;
- condizioni idrodinamiche all'interno di piazza Umberto I;
- modalità di efflusso a mare del tratto tombato;
- condizioni idrodinamiche all'interno del bar La Risacca.

I primi tre aspetti sono finalizzati a verificare alcuni elementi relativi alla ricostruzione dell'evento effettuata nella prima parte. In particolare i primi due aspetti sono relativi a fenomeni che sono stati trattati in maniera semplificata, mentre il terzo ed il quarto riguardano aspetti che non sono stati affrontati nella prima parte.

Per un inquadramento generale sui primi due aspetti si rimanda alla prima parte.



Il terzo aspetto ha riguardato lo studio delle condizioni idrodinamiche di efflusso del tratto tombato nel mare. Tale approfondimento è stato effettuato al fine di effettuare una ulteriore verifica del valore della portata effettivamente defluente all'interno del tratto tombato.

Il quarto aspetto, infine, ha voluto investigare le condizioni idrodinamiche che possono avere avuto un ruolo nella tragica fine della giovane donna che lavorava nel bar La Risacca.

Per un migliore inquadramento di questa seconda parte dello studio si richiamano sinteticamente alcuni risultati raggiunti nella prima parte dello studio con riferimento ai filmati utilizzati nella ricostruzione dell'evento.

La prima operazione effettuata ha riguardato la sincronizzazione dei filmati che è stata svolta individuando al loro interno situazioni che fossero riprese in almeno due filmati, in tal senso un ruolo particolare è stato svolto dal filmato 1 che ha consentito collegare la serie di filmati da 2 a 5 con il filmato 6. Non è stato possibile sincronizzare il filmato 7 con i restanti 6. Il risultato di tale operazione è riportato nella tabella 1.

Filmato	Durata	Inizio	Fine	Note
1	04:21	10:16	14:37	si sovrappone a 2 e 6
2	08:53	00:00	08:53	si sovrappone a 1 e 6
3	15:53	09:03	24:56	segue 2
4	02:58	24:56	27:54	segue 3
5	01:48	27:54	29:42	segue 4
6	11:34	11:05	22:39	si sovrappone a 1 e 2
7	02:53			non sincronizzato

Tabella 1 - Durata e sincronizzazione dei filmati utilizzati per la ricostruzione dell'evento

La successiva analisi del contenuto dei filmati ha permesso di ricostruire la cronologia complessiva dell'evento che è riportata nella tabella 2.

Le simulazioni sono state effettuate utilizzando un approccio di tipo euleriano con trattamento delle superficie libera basata sull'approccio denominato Volume Of Fluid (VOF), per la risoluzione delle equazioni è stato utilizzato il software Flow3D<sup>®</sup> della Flow Science.

La risoluzione avviene tramite la soluzione discretizzata in forma implicita delle equazioni di Navier-Stokes. Tutte le simulazioni sono state eseguite con fluido viscoso imponendo un modello di turbolenza a due equazioni di tipo  $k-\varepsilon$ .



Video						Tempo relativo	Tempo assoluto	Evento
1	2	3	4	5	6			
	<b>00:00</b>					00:00	18:40:00	Inizio video
	<b>08:53</b>					08:53	18:48:53	Fine video
		<b>00:00</b>				09:10	18:49:10	Inizio video
		01:34				10:44	18:50:44	Arrivo flusso da monte
00:40		01:50				11:00	18:51:00	Partenza furgone blu
00:52					<b>00:00</b>	11:05	18:51:05	Visualizzazione flusso da monte
01:20					00:25	11:30	18:51:30	Fioriera trasportata
					00:53	11:58	18:51:58	Arrivo primo motorino
					00:55	12:00	18:52:00	Aumento portata fioriera sommersa
					01:22	12:27	18:52:27	Arrivo Panda Bianca
		03:35				12:45	18:52:45	No efflusso dal parcheggio
					01:55	13:00	18:53:00	La Panda viene rimobilizzata
		03:57				13:07	18:53:07	Inizio efflusso da parcheggio
					02:08	13:13	18:53:13	Arrivo 7 autovetture
					02:15	13:20	18:53:20	Inizio accumulo nella piazza
					03:00	14:05	18:54:05	Arrivo 1 autovettura
					03:05	14:10	18:54:10	Arrivo 3 autovetture
					03:21	14:26	18:54:26	Arrivo 3 autovetture
					03:30	14:35	18:54:35	Arrivo 10 autovetture
					03:35	14:40	18:54:40	Inizio aumento livello nella piazza
		05:53				15:03	18:55:03	Arresto flusso dal parcheggio
		05:55				15:05	18:55:05	Inizio efflusso spiaggia
		06:32				15:42	18:55:42	Uscita prime autovetture da spiaggia
		07:00				16:10	18:56:10	Ripresa flusso dal parcheggio
					05:30	16:35	18:56:35	Arrivo 1 autovettura color verde (irrompe nel Bar Risacca ?)
		08:15				17:25	18:57:25	Panda Bianca + 2 autovetture su parcheggio
		08:35				17:45	18:57:45	Panda Bianca urta autovetture su parcheggio
					07:15	18:20	18:57:30	Raggiungimento livello costante nella piazza
					<b>11:34</b>	22:39	19:02:39	Fine video
		<b>15:53</b>				25:03	19:05:03	Fine video
			<b>00:00</b>			25:15	19:05:15	Inizio video
			<b>02:58</b>			28:13	19:08:13	Fine video
				<b>00:00</b>		28:30	19:08:30	Inizio video
				<b>01:48</b>		30:18	19:10:18	Fine video

Tabella 2 – Cronologia complessiva evento

### 1. Effetto delle travi di sostegno della copertura dell'alveo sulle perdite di carico

Il primo aspetto che è apparso meritevole di un ulteriore approfondimento ha riguardato la valutazione dell'effetto provocato dalla presenza delle travi di sostegno della soletta di copertura dell'alveo tombato emergenti all'interno dell'alveo.

La finalità della modellazione è stata quella di verificare i risultati della modellazione semplificata utilizzata nella prima parte.



Per una migliore comprensione del problema si riportano alcune considerazioni svolte nella prima parte dello studio. E' noto che uno dei principali problemi legati alla presenza di tratti tombati è legato alla possibilità che l'aumento della portata in arrivo comporti la transizione dal funzionamento a superficie libera al funzionamento in pressione. Tale transizione comporta il brusco incremento del perimetro bagnato con la conseguente riduzione del raggio idraulico e della capacità di trasporto.

La valutazione dell'effetto delle travi di sostegno della copertura dell'alveo sulle perdite di carico è stata affrontata utilizzando una modellazione semplificata secondo la quale l'emersione della trave nella corrente comporta una perdita di carico di tipo concentrato valutabile come se si fosse in presenza di un restringimento. Secondo tale schema la perdita di carico è esprimibile come:

$$\Delta h = \xi \frac{V^2}{2g} \quad (1)$$

in cui  $\xi$  è un coefficiente di origine empirica.

Utilizzando la (1) le perdite di carico complessive  $\Delta H$  tra due travi successive poste a distanza  $l$ , utilizzando la formula di Manning, risultano:

$$\Delta H = J l + \Delta h = \frac{n^2 V^2}{R^{4/3}} l + \xi \frac{V^2}{2g} \quad (2)$$

esprimendo le perdite di carico complessive in termini di perdite di carico continue equivalenti:

$$\Delta H = J_{eq} l = \frac{n_{eq}^2 V^2}{R^{4/3}} = \frac{V^2}{R^{4/3}} \left( n^2 + \frac{\xi R^{4/3}}{2gl} \right) \quad (3)$$

si ottiene l'espressione del coefficiente di scabrezza equivalente di Manning:

$$n_{eq}^2 = \left( n^2 + \frac{\xi R^{4/3}}{2gl} \right) \quad (4)$$

Nella prima parte dello studio l'espressione (4) è stata utilizzata per definire il coefficiente di scabrezza equivalente da inserire nel modello idraulico per modellare il comportamento in pressione del tratto di alveo tombato del torrente Dragone dove sono presenti le travi emergenti.

Per verificare l'approssimazione introdotta nei calcoli dalla applicazione della (4) si sono effettuate una serie di simulazioni numeriche su uno schema semplificato. Infatti al fine di ottimizzare la ricostruzione del campo di velocità la simulazione è stata limitata al caso di una sezione rettangolare molto larga nella quale si è trascurato il contributo delle pareti laterali allo sforzo resistente.

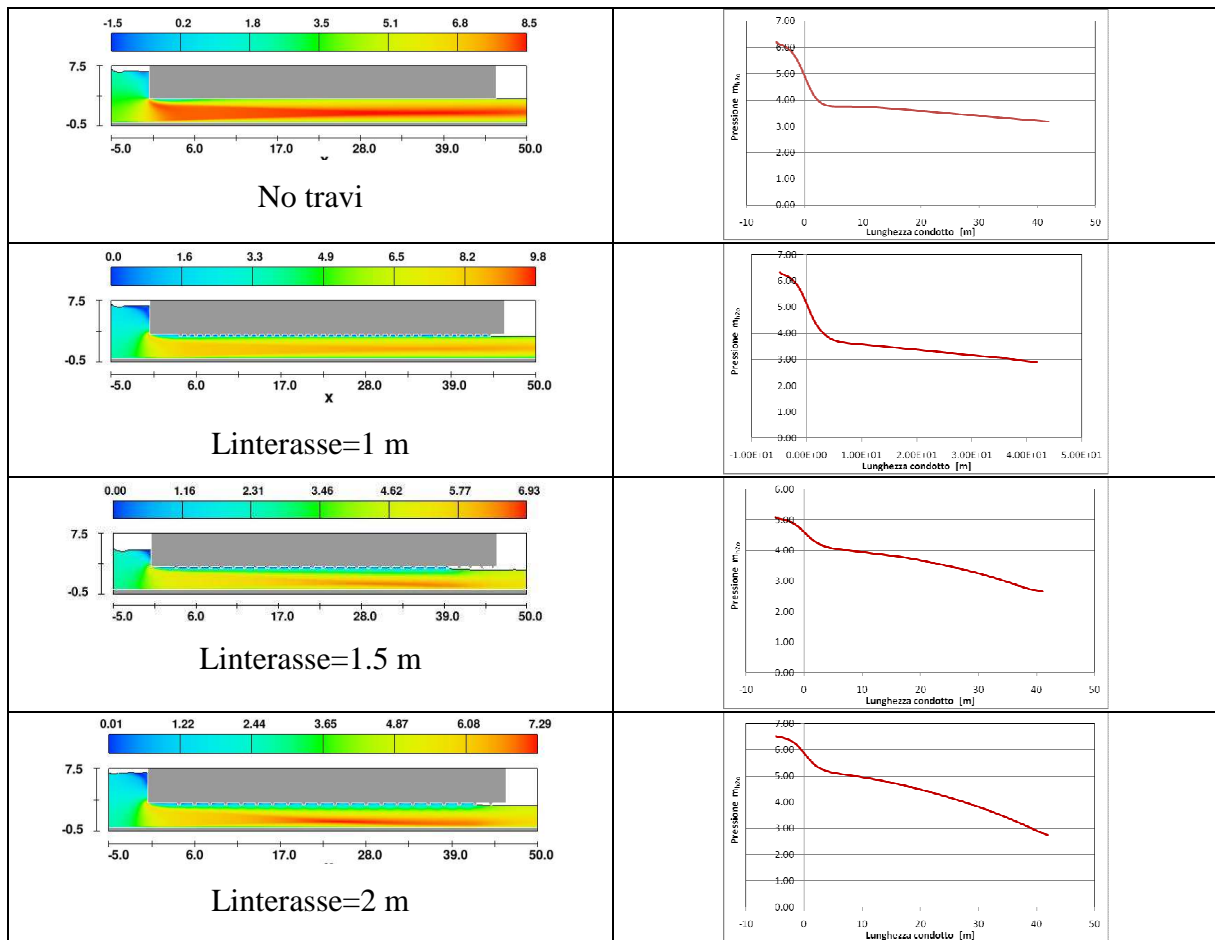


L'altezza interna della sezione al netto della travi è stata posta pari a  $2.5\text{ m}$ , le travi emergenti sono state assunte di forma quadrata con dimensione  $0.30 \times 0.30\text{ m}$  e l'interasse  $l$  variabile è stato variato da  $1$  a  $8\text{ m}$ .

Come condizioni al contorno si sono fissati, per tutte le simulazioni, valori costanti della pressione alle estremità. La lunghezza del tratto è stata fissata in maniera tale da garantire la presenza di un elemento centrale caratterizzato da condizioni di moto non influenzate dalle condizioni agli estremi.

I risultati delle simulazioni sono consistiti nel valore della portata defluente e nella determinazione della cadente piezometrica che, al fine di eliminare gli inevitabili effetti locali dovuti alla condizioni al contorno alle estremità, è stata valutata con riferimento al solo elemento centrale.

Nella figura 1 sono riportati gli andamenti delle isolinee di velocità per valori crescenti dell'interasse  $l$  tra le travi ed il corrispondente andamento delle pressione media.



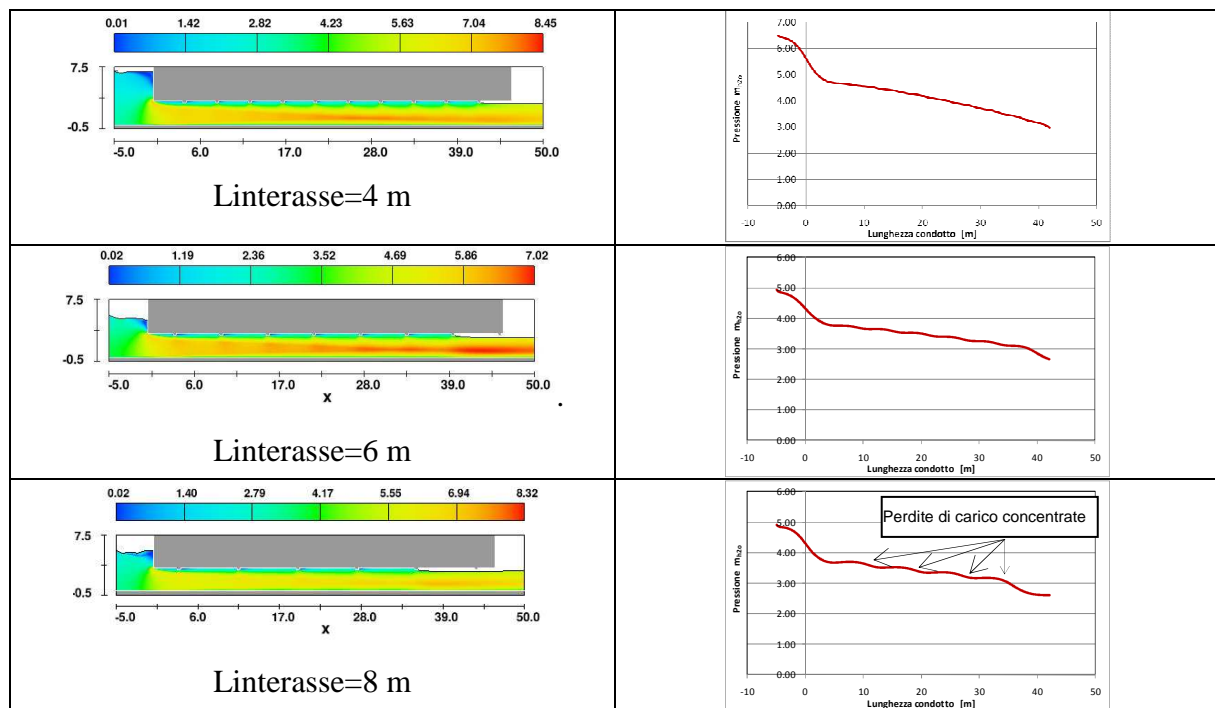


Figura 1 - Isolinee di velocità ed andamento della pressione media in funzione dell'interasse tra le travi

L'osservazione della figura 1 suggerisce che per valori ridotti dell'interasse  $l$  l'effetto delle travi risulta amalgamato con quello relativo alle perdite di carico continue, e che solo a partire da valori dell'interasse pari a  $6\text{ m}$ , si evidenzia nel grafico relativo all'andamento della pressione la presenza di singolarità legate alle singole travi.

Il confronto tra i valori del coefficiente di scabrezza equivalente ricavati dalle simulazioni numeriche ed i valori ottenuti mediante l'applicazione della formula (4) è riportato nella figura 2. Per quanto riguarda la formula (4) nella figura 2 sono riportate 3 curve relative a differenti valori del coefficiente  $\zeta$  relativo alle perdite di carico localizzate.

L'osservazione della figura 2 evidenzia i seguenti aspetti:

- l'effetto indotto dalla presenza delle travi presenta un andamento a campana con un valore dell'interasse critico che massimizza l'incremento di resistenza al moto;
- la formula 4 non è in grado di rappresentare il comportamento relativo ad interassi minori rispetto a quello critico;
- per valori dell'interasse superiori a quello critico la formula (4) comporta un recupero del coefficiente di scabrezza verso il valore indisturbato più lento rispetto a quanto evidenziato dalle simulazioni numeriche, ovviamente la coincidenza tra i risultati ottenuti dalla applicazione della formula (4) ed i risultati numerici migliora all'aumentare dell'interasse tra le travi a mano a mano che lo schema fisico approssima quello teorico ;

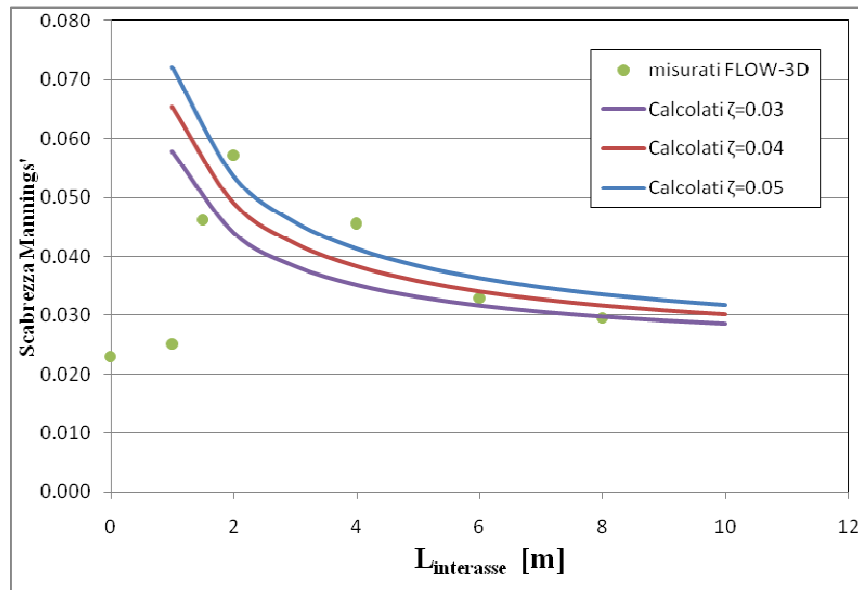


Figura 2 – Confronto tra il valore del coefficiente di Manning equivalente valutato con la (4) ed i risultati delle simulazione numeriche riportati in funzione dell'interasse  $l$  tra le travi

In conclusione le simulazioni numeriche effettuate hanno confermato l'ipotesi qualitativa, introdotta nella prima parte dello studio, che la presenza di travi emergenti comporta una riduzione aggiuntiva della capacità di trasporto dei tratti tombati rispetto a quella che normalmente avviene nella transizione da moto a superficie libera a moto in pressione.

Anche dal punto di vista quantitativo i risultati numerici supportano l'applicazione della formula (4) che appare tecnicamente accettabile in particolare quando si faccia riferimento al fatto che nei casi reali, a causa della presenza delle pareti laterali, l'incremento del coefficiente di scabrezza equivalente dovuto alla presenza delle travi risulta percentualmente meno significativo rispetto a quanto evidenziato dalle simulazioni numeriche nelle quali tale effetto non era presente.

## 2. Condizioni idrodinamiche all'interno di piazza Umberto I

Il secondo aspetto che si è inteso riprodurre mediante una simulazione di tipo tridimensionale ha riguardato le condizioni idrodinamiche all'interno di piazza Umberto I.

Anche in questo caso la finalità della modellazione è stata quella di verificare i risultati della modellazione semplificata del flusso in piazza Umberto I discussa nella prima parte.

La prima parte dello studio ha evidenziato che l'occlusione del porticato che collega piazza Umberto I al parcheggio, dovuto all'accumulo delle autovetture trasportate dalla corrente, ha

comportato la deviazione del flusso verso l'interno della stessa piazza e il conseguente deflusso attraverso il porticato che collega la piazza alla spiaggia

Per consentire il deflusso della portata in arrivo in piazza Umberto I il livello idrico ha raggiunto, sul lato di monte della piazza, una quota pari a circa 1.75 m.

Nella prima parte dello studio si è utilizzato un approccio monodimensionale secondo il quale l'efflusso verso l'interno della piazza è stato rappresentato mediante una soglia laterale mentre l'efflusso dal *porticato spiaggia* è stato simulato mediante un canale fittizio la cui condizione al contorno di valle è rappresentata dalle condizioni di stato critico.

Nella prima parte si sono anche considerati due scenari identificati in seguito come *Chiuso* ed *Aperto* (figura 3).



Figura 3 – Condizioni al contorno scenari esaminati:

- a) Scenario *Chiuso* (efflusso ridotto attraverso il porticato piazza)
- b) Scenario *Aperto* (efflusso libero attraverso entrambi i porticati)

Lo scenario *Chiuso* ha inteso riprodurre quanto effettivamente avvenuto la sera del 9 settembre 2010 introducendo nella modellazione la chiusura parziale del *porticato parcheggio* verificatasi a

causa dell'accumulo di autovetture a monte del porticato stesso. La condizione al contorno per lo scenario *Chiuso* è stata ottimizzata ricercando quella che consentisse il deflusso dal *porticato parcheggio* di una portata analoga a quella che si è stimata sia defluita dal parcheggio ( $3-4 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Lo scenario *Aperto* ha inteso simulare cosa sarebbe avvenuto se la parziale occlusione del *porticato piazza* non si fosse verificata.

Lo scopo della simulazione tridimensionale è stato quello di verificare l'effetto della notevole dissimmetria del flusso sulle condizioni di efflusso nel restringimento del porticato spiaggia.

## 2.1. Risultati scenario *Chiuso*

Per quanto riguarda lo scenario *Chiuso* i risultati della simulazione sono sintetizzati nella figura 4 e nella successiva figura 5.

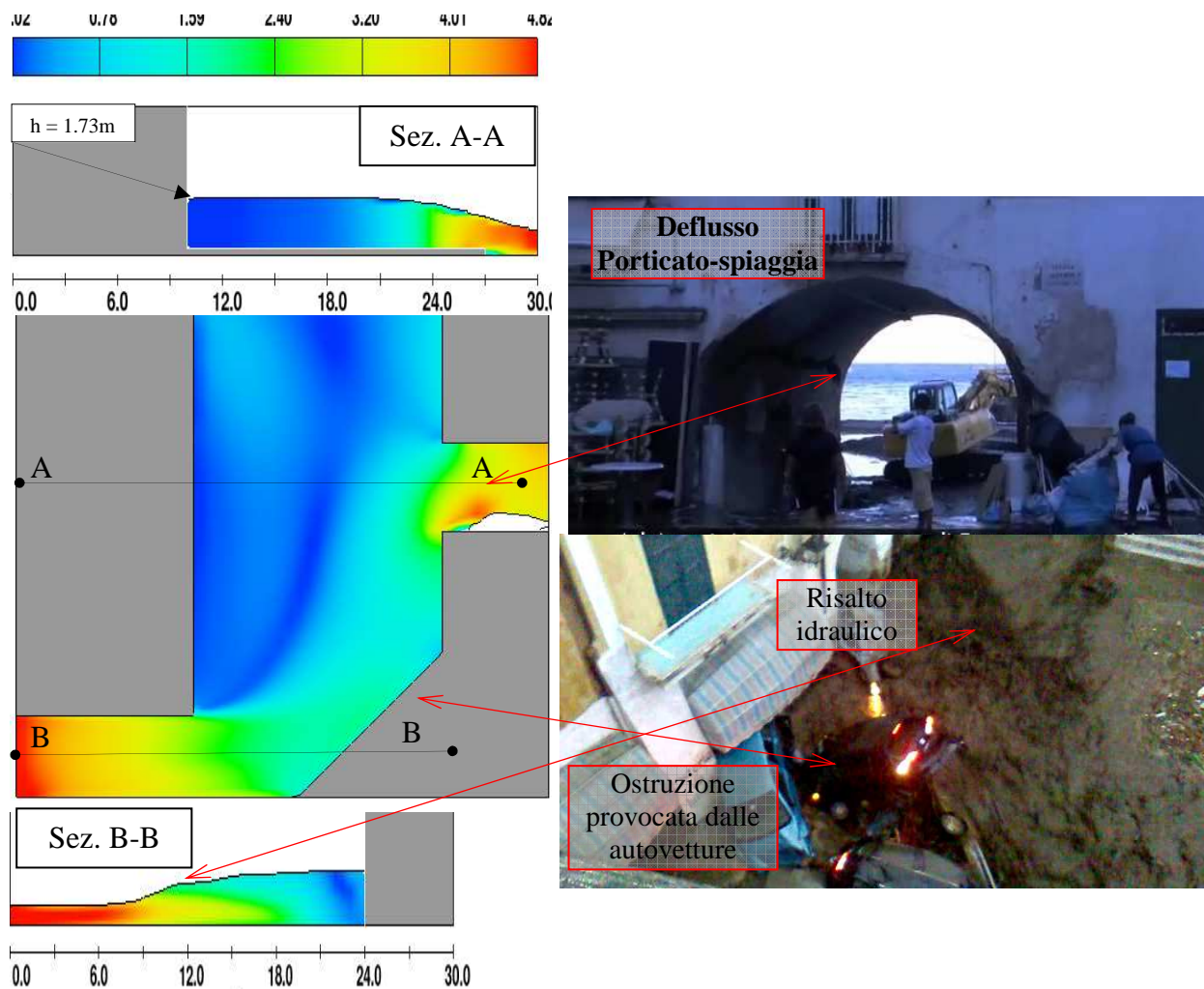


Figura 4 – Risultati scenario *Chiuso* isolinee velocità

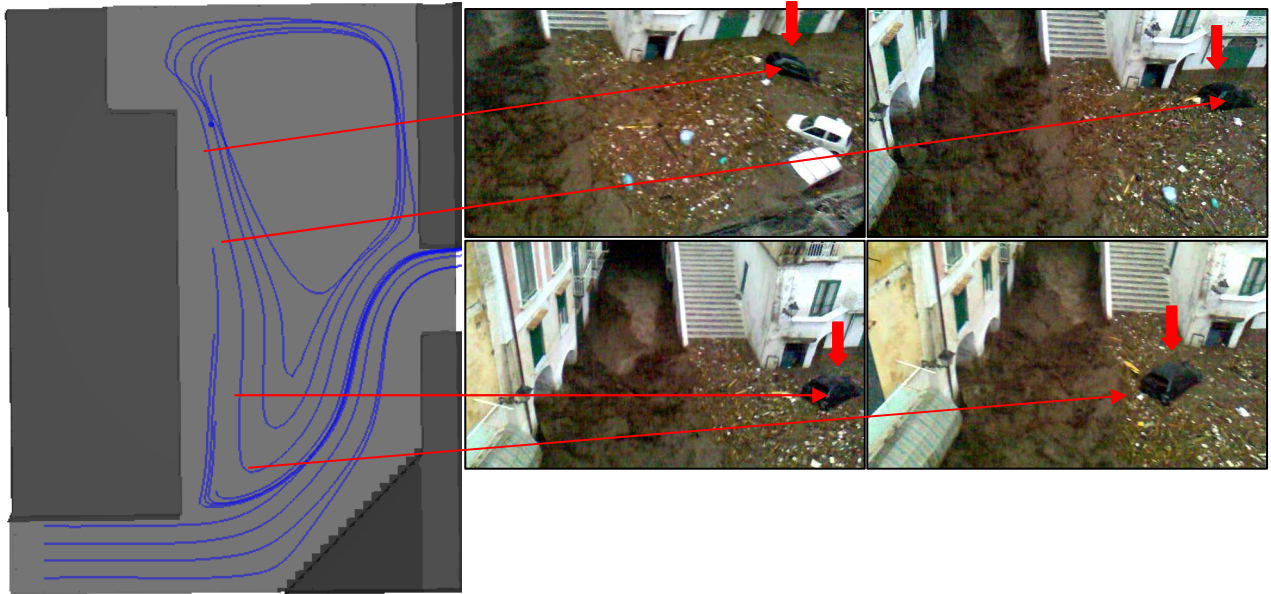


Figura 5 – Risultati scenario *Chiuso* linee di corrente

L'osservazione delle figure 4 e 5 suggerisce che la simulazione tridimensionale riproduce correttamente i caratteri qualitativi e quantitativi di quanto avvenuto in piazza Umberto I

Nella figura 4 le sezioni A-A e B-B confermano che la simulazione numerica riproduce quanto osservabile nella documentazione filmata. In particolare la sezioni A-A conferma che il livello raggiunto sul lato di monte della piazza risulta prossimo a 1.75 m, mentre la sezione B-B conferma la presenza del risalto idraulico dovuto al passaggio della corrente veloce in arrivo da via dei Dogi in corrente lenta.

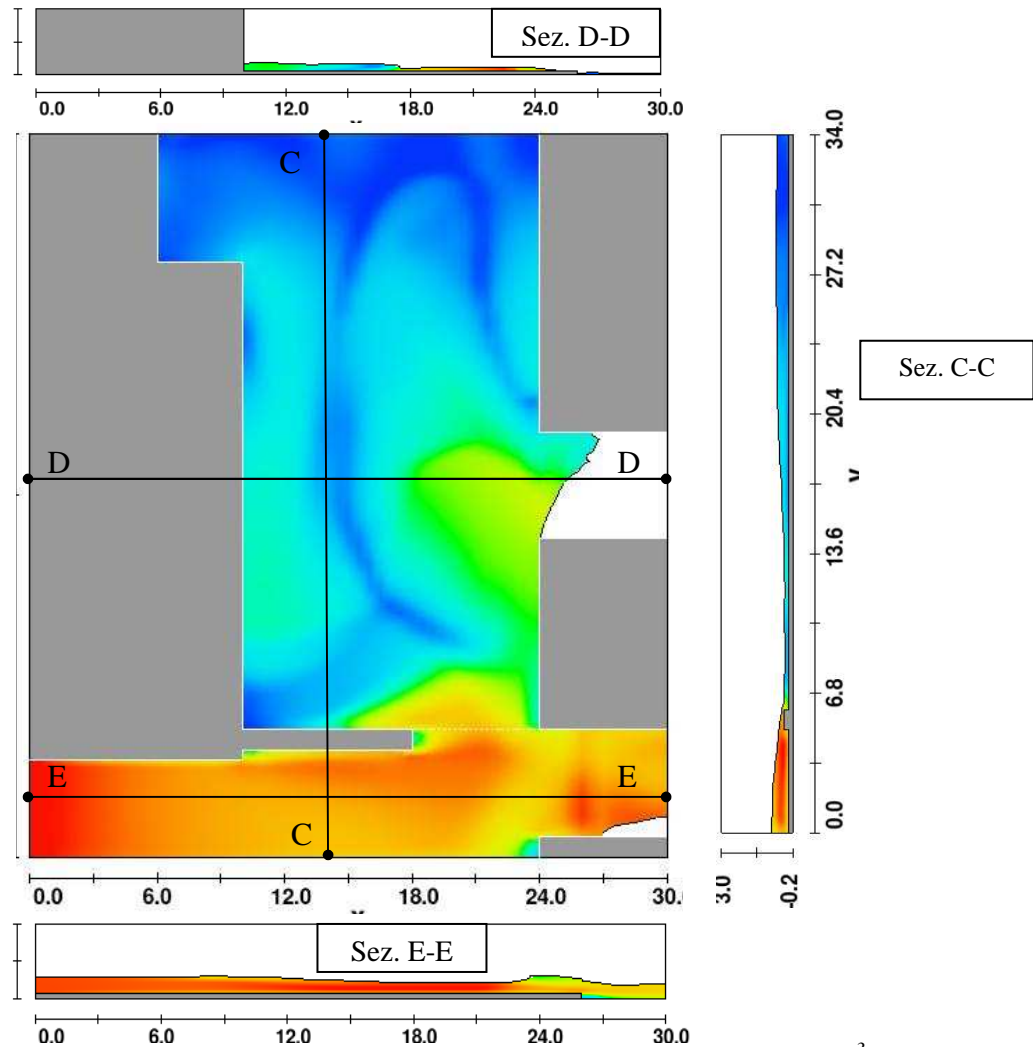
La sostanziale coincidenza del livello determinato sulla base delle riprese filmate e dei rilievi con quanto determinato con le simulazioni numeriche e con lo schema monodimensionale indica che nonostante la notevole dissimmetria l'efflusso è sostanzialmente governato dalle condizioni di stato critico in prossimità del porticato spiaggia.

L'andamento chiuso delle linee di riportato corrente nella figura 5 indica la presenza di una larga zona di ricircolazione all'interno della piazza che è ampiamente confermata da quanto si può osservare nel video 6 discusso nella prima parte del presente studio. A titolo di esempio nella figura 5 sono anche riportati alcuni fotogrammi, estratti da tale video, che evidenziano il moto circolare di una autovettura all'interno della piazza.

## 2.2. Risultati scenario *Aperto*

Per quanto riguarda lo scenario *Aperto* i risultati della simulazione sono sintetizzati nella figura 6.

Lo scenario *Aperto* è particolarmente significativo perché intende riprodurre cosa sarebbe accaduto se non si fosse verificato l'ostruzione del porticato di via dei Dogi. I dati contenuti nella figura 6 confermano quanto determinato nella prima parte del studio con l'applicazione della modellazione monodimensionale e cioè che il livelli idrici sarebbero risultati complessivamente più bassi. In dettaglio essi sarebbero stati di circa 60 cm lungo via dei Dogi e di circa 35 cm



all'interno della piazza, la portata deviata verso la piazza sarebbe stato di soli  $6.5 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Figura 6 – Risultati scenario *Aperto* isolinee di velocità

Nel complesso le simulazioni tridimensionali relative a piazza Umberto I confermano sia la capacità della modellazione tridimensionale di riprodurre di tale fenomeni con elevata precisione sia la possibilità di affrontare tale studio anche con una modellazione di tipo monodimensionale di più facile applicazione e computazionalmente meno costosa.



### 3. Modalità di efflusso a mare del tratto tombato

Il terzo aspetto che è stato approfondito con la modellazione tridimensionale ha riguardato le condizioni idrodinamiche che hanno caratterizzato l'efflusso nel mare della corrente defluente nel tratto tombato.

La finalità della modellazione è stata quella di confrontare le caratteristiche del flusso ottenute con la simulazione tridimensionale con le caratteristiche osservabili nei filmati dell'evento al fine di ottenere una conferma indiretta della valutazione della portata massima defluente nel tratto tombato.

Nella documentazione video relativa alla zona di mare prospiciente l'efflusso si possono riconoscere tre zone:

- un prima zona (figura 7), posta immediatamente a valle dello sbocco, dove si nota il flusso effluente dal tratto tombato che presenta una notevole curvatura cui fa seguito la presenza di un risalto idraulico;
- una zona intermedia (figura 8) in cui è ancora presente una notevole agitazione;
- una zona esterna (figura 8) che risente in maniera minore della immissione.

La prima zona, come si evince dalla figura 7 dove la presenza di alcune imbarcazioni di modeste dimensioni consentono di definire la scala del fenomeno, presenta una estensione limitata a pochi metri.



Figura 7 – Efflusso tratto tombato zona 1 risalto idraulico

La seconda zona, coincidente con la zona di maggiore agitazione visibile nella figura 8, presenta anche essa una estensione abbastanza limitata, infine la terza zona risulta più ampia con un contorno chiaramente identificabile verso l'esterno.



Figura 8 – Efflusso tratto tombato zona di agitazione intermedia e zona esterna

Nel caso in esame la principale difficoltà esistente nel confrontare i risultati delle simulazioni numeriche con i filmati risiede nel fatto che i filmati presentano una notevole distorsione legata al punto di ripresa e rendono quindi difficile la valutazione delle distanze.

Tale difficoltà è stata superata utilizzando la presenza di punti di cui è nota la posizione, quali gli estremi della barriera frangiflutto e gli spigoli della banchina portuale posta in destra della sezione di efflusso del tratto tombato, che sono stati utilizzati come punti di fede. Tali punti sono stati utilizzati per validare i risultati della modellazione sulla base di fotogrammi estratti dal video 1. In dettaglio l'operazione effettuata è consistita nel distorcere l'immagine contenente le isolinee di velocità ottenute dalla simulazione numerica in maniera tale che i punti di fede presenti nel modello coincidessero con quelli del fotogramma estratto dal video 1.

Nella figura 9 è riportato il confronto per un valore della portata pari a  $45 \text{ m}^3/\text{s}$ , nella figura si evidenzia una buona corrispondenza tra la zona di maggiore agitazione visibile nel filmato e la zona in cui la simulazione presenta valori della velocità superiori a zero.

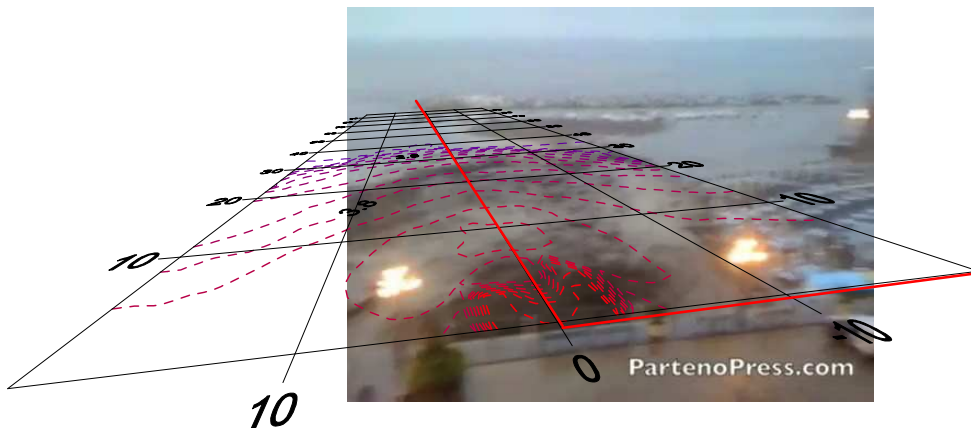


Figura 9 - Rappresentazione prospettica delle isolinee di velocità su un fotogramma estratto dal video 1

Una rappresentazione dell'alto, non distorta, dei risultati dei calcoli per la medesima portata è riportata nella figura 4. Per una più agevole comprensione dei risultati nella figura 10 sono anche riportate delle linee di fede relativa a punti topografici significativi. I risultati delle simulazioni indicano una estensione della zona di disturbo pari a circa 40 m.



Figura 10 - Rappresentazione dei risultati delle simulazioni su una vista aerea

E' anche interessante osservare che la zona di agitazione superficiale ripresa dai filmati e riprodotta dalle simulazioni numeriche nella figura 10 coincide in buona sostanza con la zona di espansione delle spiagge evidenziata nella figura 11 estratta dalla prima parte dello studio.

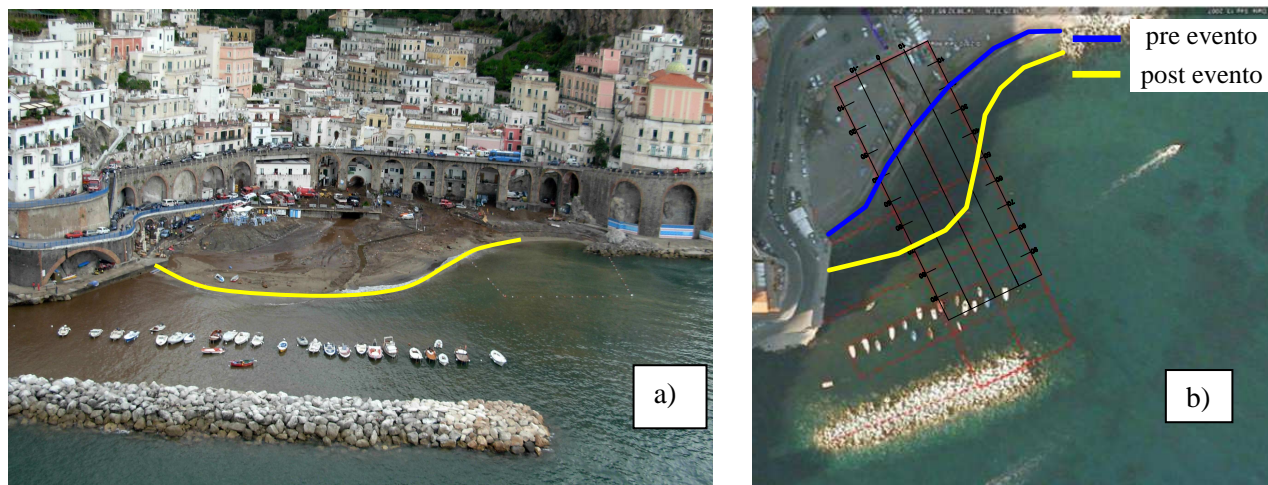


Figura 11 – Area di deposito sulla spiaggia: a) post evento b) pre evento (settembre 2007)

#### 4. Condizioni idrodinamiche all'interno del bar La Risacca

Il quarto aspetto che si è voluto approfondire ha riguardato lo studio dei flussi all'interno dei locali che si affacciano su piazza Umberto I e che ospitavano il Bar La Risacca.

E' opportuno premettere che le simulazioni descritte di seguito non possono e non intendono riprodurre esattamente quanto avvenuto nella tragica sera del 9 settembre 2010 in quanto esse si basano su elementi conoscitivi che non sono esaustivi della realtà. In particolare la ricostruzione di quanto accaduto all'interno del Bar è stata basata esclusivamente su quanto riportato nelle cronache giornalistiche, mentre per quanto riguarda lo stato dei luoghi si è adottata una schematizzazione semplificata rispetto alla effettiva geometria dei locali inoltre non si è tenuto conto della presenza di eventuali arredi interni che potrebbero avere contribuito alla evoluzione dell'evento.

Sulla base delle testimonianze giornalistiche disponibili si può ritenere che la giovane donna si trovava all'interno del Bar e che le porte verso piazza Umberto I erano state chiuse, le cronache non precisano in quale locale si trovasse la donna. I resoconti giornalistici riportano che la donna è stata trascinata all'esterno da un'onda penetrata all'improvviso nel locale dove si trovava, le cronache riportano inoltre che un'altra persona che si trovava nel locale ha evitato di essere trascinato dalla corrente aggrappandosi al lampadario.

L'analisi svolta nel presente studio è stata finalizzata alla definizione di configurazioni geometriche e modalità di irruzione dell'onda le cui caratteristiche idrodinamiche siano



compatibili con la ricostruzione degli eventi riportata in precedenza, in particolare con il fatto che il corpo della donna è stato trascinato dalla corrente al di fuori del locale.

A tal fine sono stati implementati tre possibili configurazioni:

- singolo locale (Configurazione A).
- 2 locali ed apertura simultanea di entrambe le porte (Configurazione B);
- 2 locali ed apertura di una singola porta (Configurazione C).

Per quanto riguarda l'irruzione della corrente nel locale tale circostanza deve essersi avvenuta solo dopo che il livello all'interno della piazza ha raggiunto una quota tale da comportare un rapido allagamento dei locali.

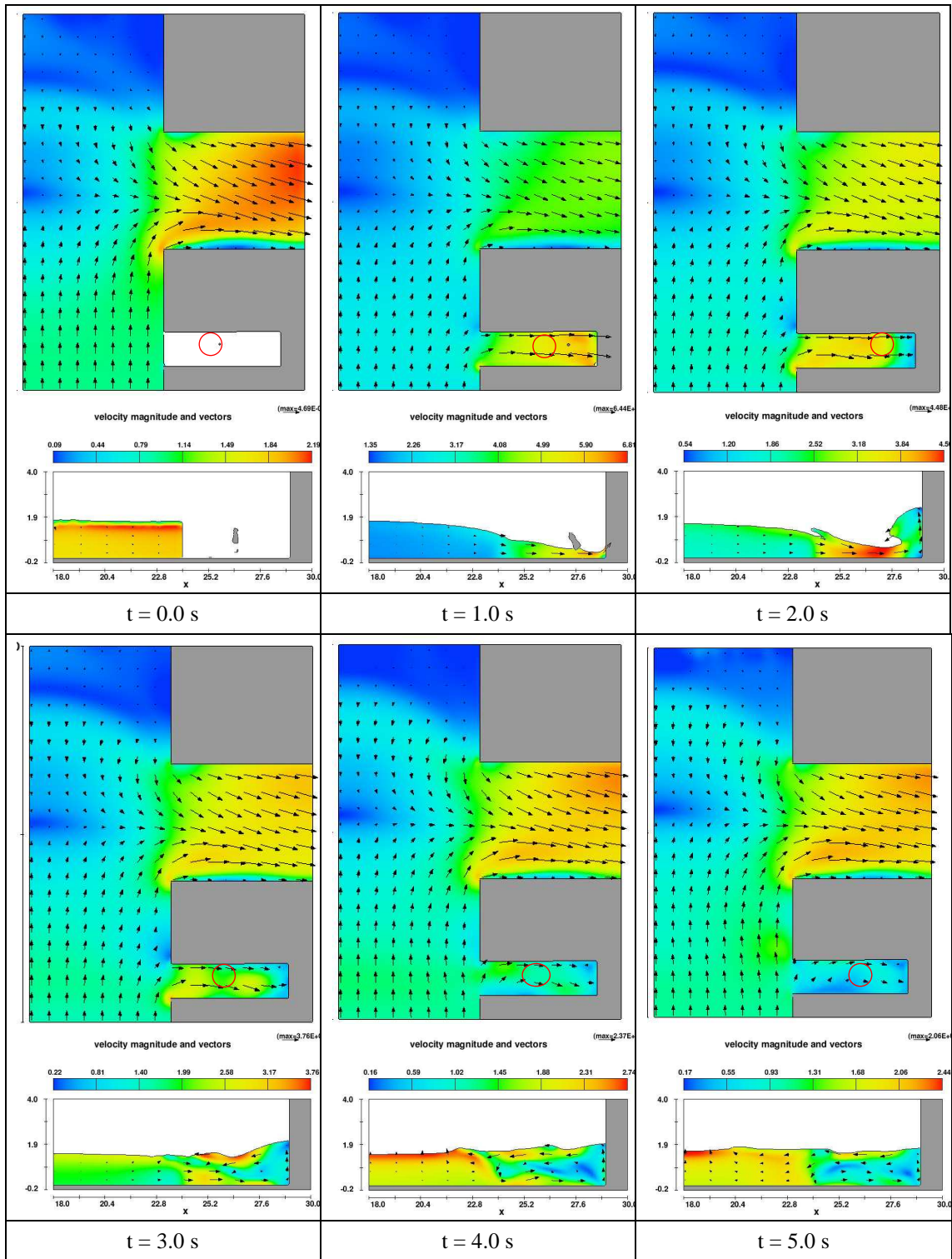
Per tutte le configurazioni esaminate si sono assunti i seguenti elementi:

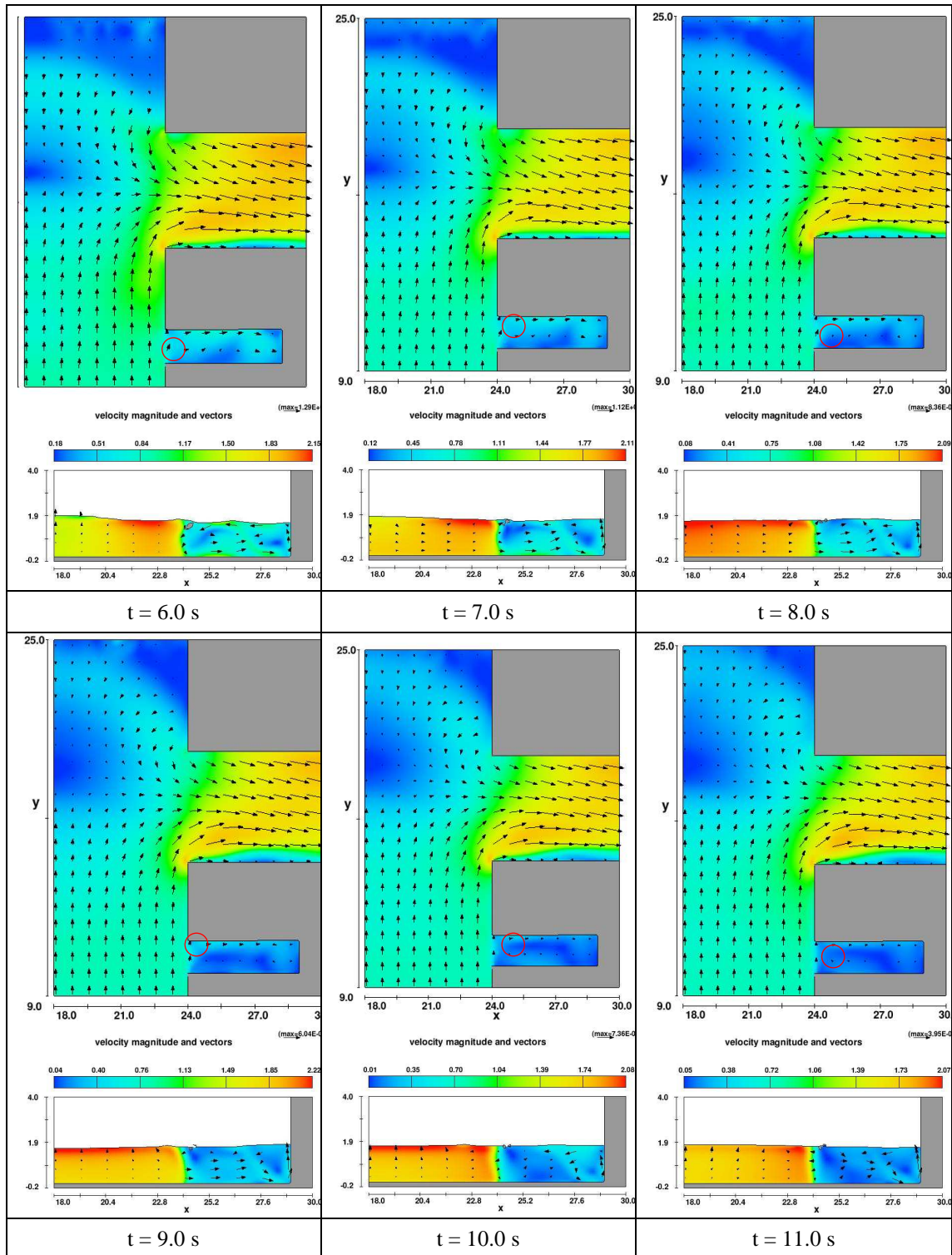
- condizioni geometriche semplificate per le quali la larghezza del vano risulta coincidente con quella della apertura;
- condizione di massima altezza nella piazza;
- rimozione istantanea delle ante della porta.

La presenza della donna è stata simulata inserendo nella simulazione un oggetto avente dimensioni analoghe a quelle di un corpo umano e con un peso specifico uguale a quello dell'acqua.

#### **4.1. Analisi della Configurazione A**

I risultati relativi alla *Configurazione A* sono riportati nella figura 12. Per una migliore comprensione delle evoluzioni del fenomeno nella figura 12 sono riportate la vista planimetrica e la vista longitudinale riferite ai medesimi istanti temporali. La posizione occupata dall'oggetto rappresentativo del corpo ai diversi istanti temporali è indicata con un cerchio.





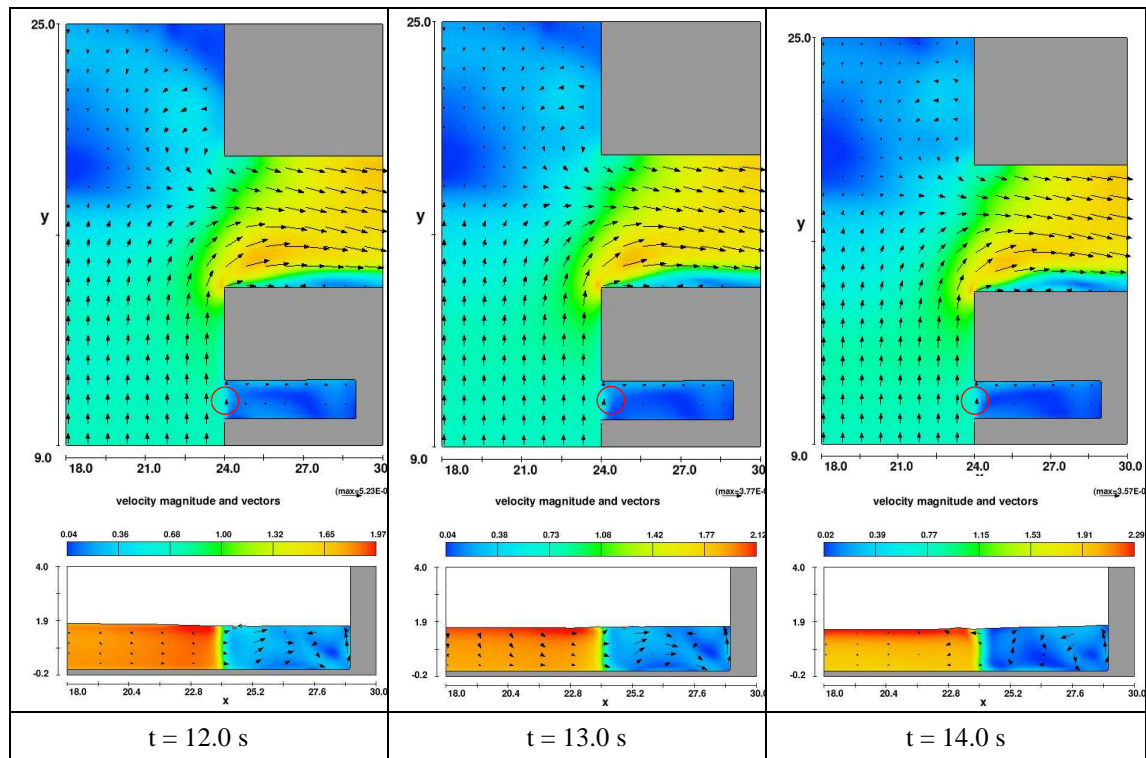


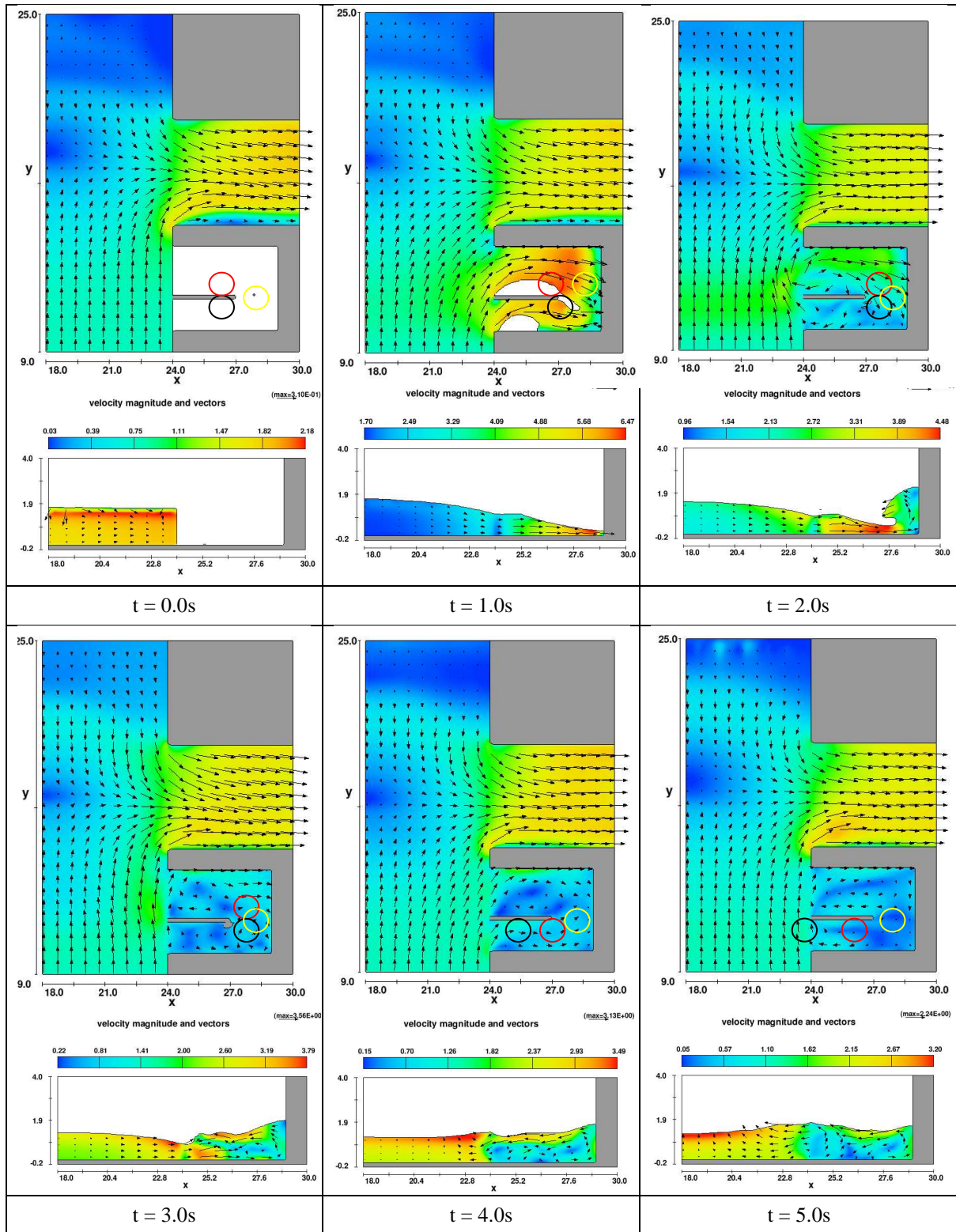
Figura 12 - Configurazione A singolo locale

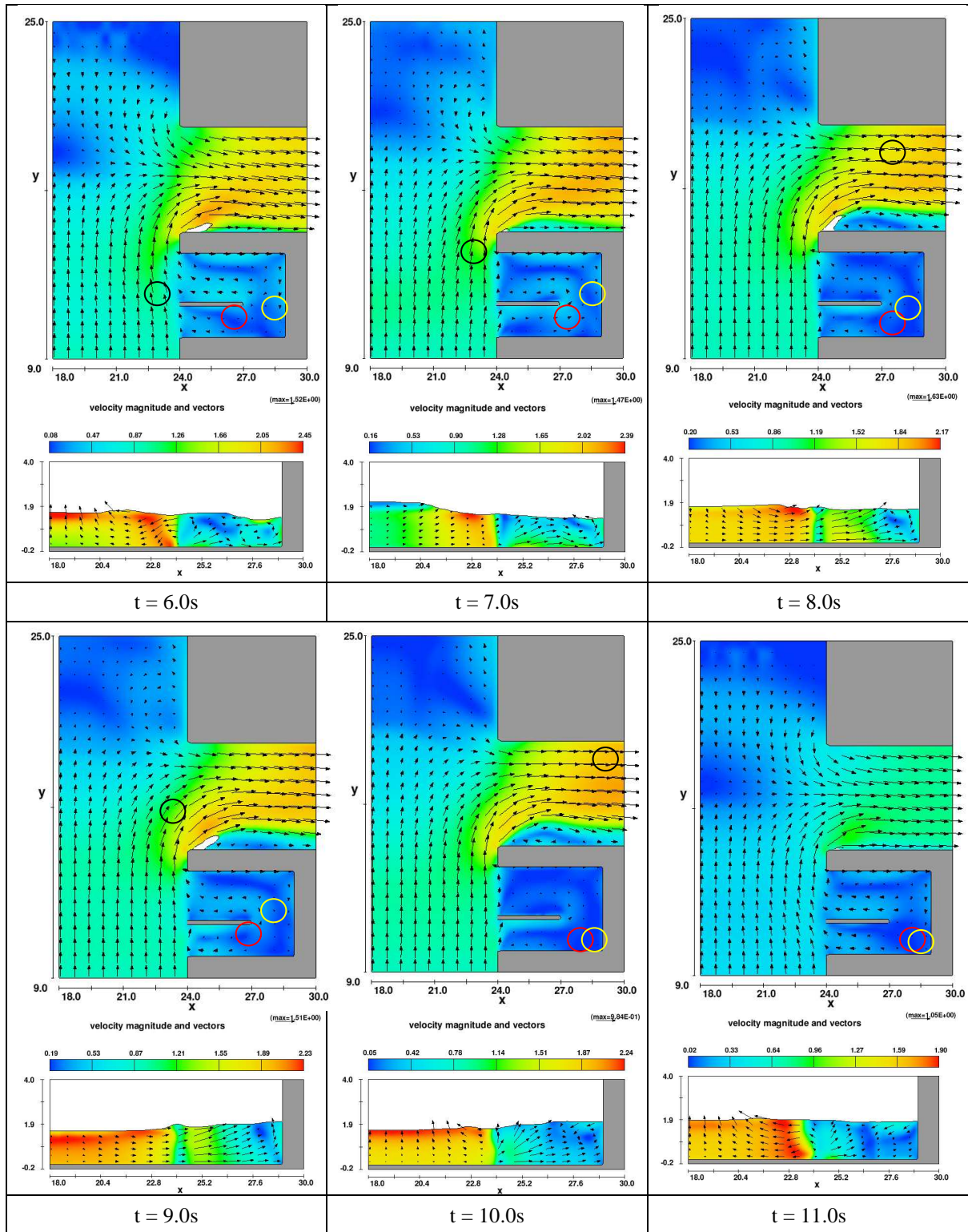
Nella configurazione A è evidente la formazione di una corrente orizzontale che raggiunge la parete opposta in circa 1 s e che comporta il riempimento del locale in soli 3 s. L'impatto della corrente sulla parete opposta a quella di ingresso provoca la formazione di un getto verticale e successivamente di un'onda riflessa accompagnata dalla presenza di un consistente flusso diretto verso l'esterno del locale. Negli istanti successivi, come è chiaramente evidenziato dai vettori riportati nelle sezioni longitudinali, si genera un flusso oscillatorio diretto alternativamente verso l'interno e l'esterno del locale con intensità progressivamente decrescente.

#### 4.2. Analisi della Configurazione B

I risultati relativi alla Configurazione B sono riportati nella figura 13, in tale Configurazione si sono ipotizzate tre possibili posizioni iniziali evidenziate nella figura 13 con tre cerchi di colore differente.







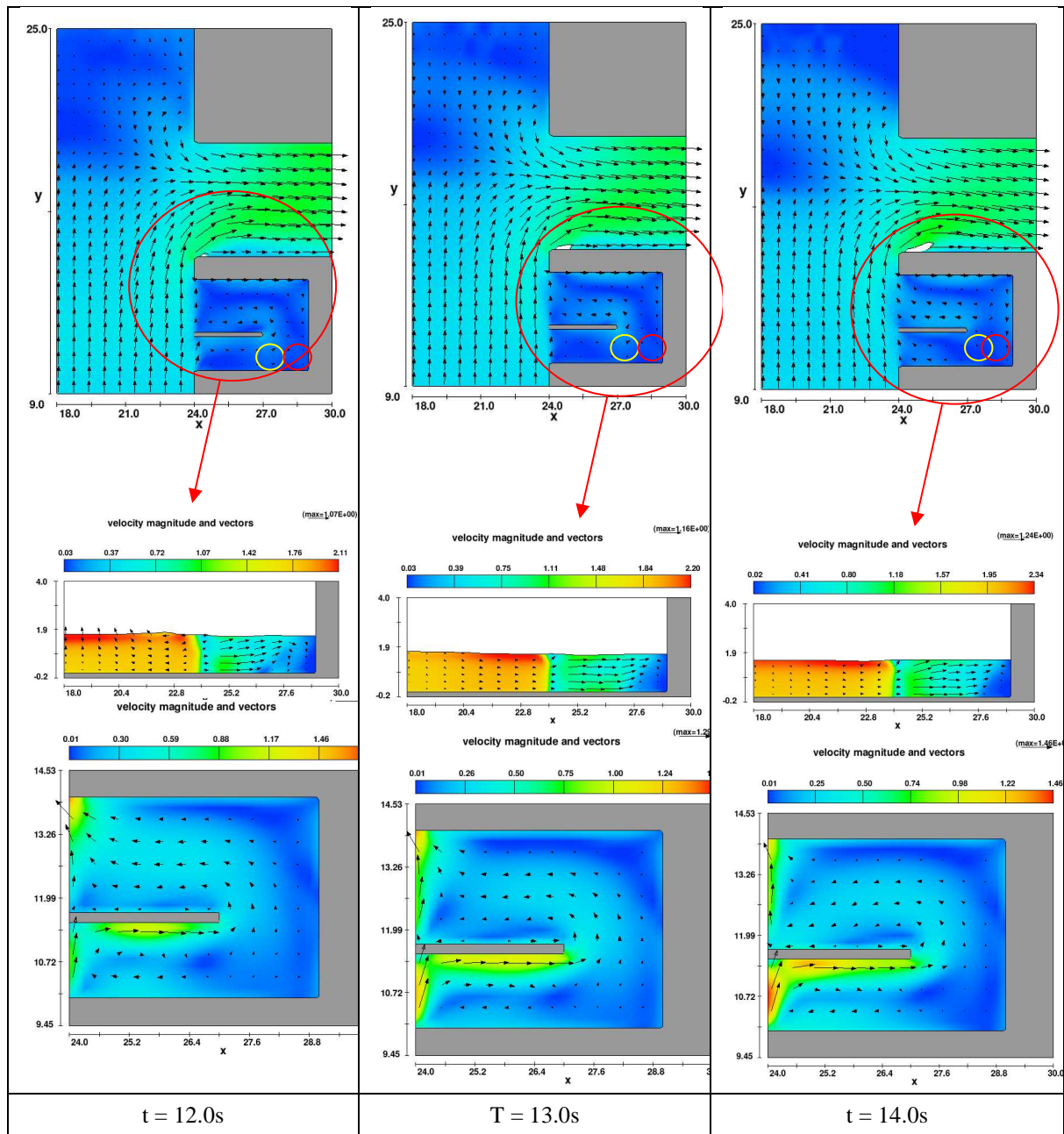


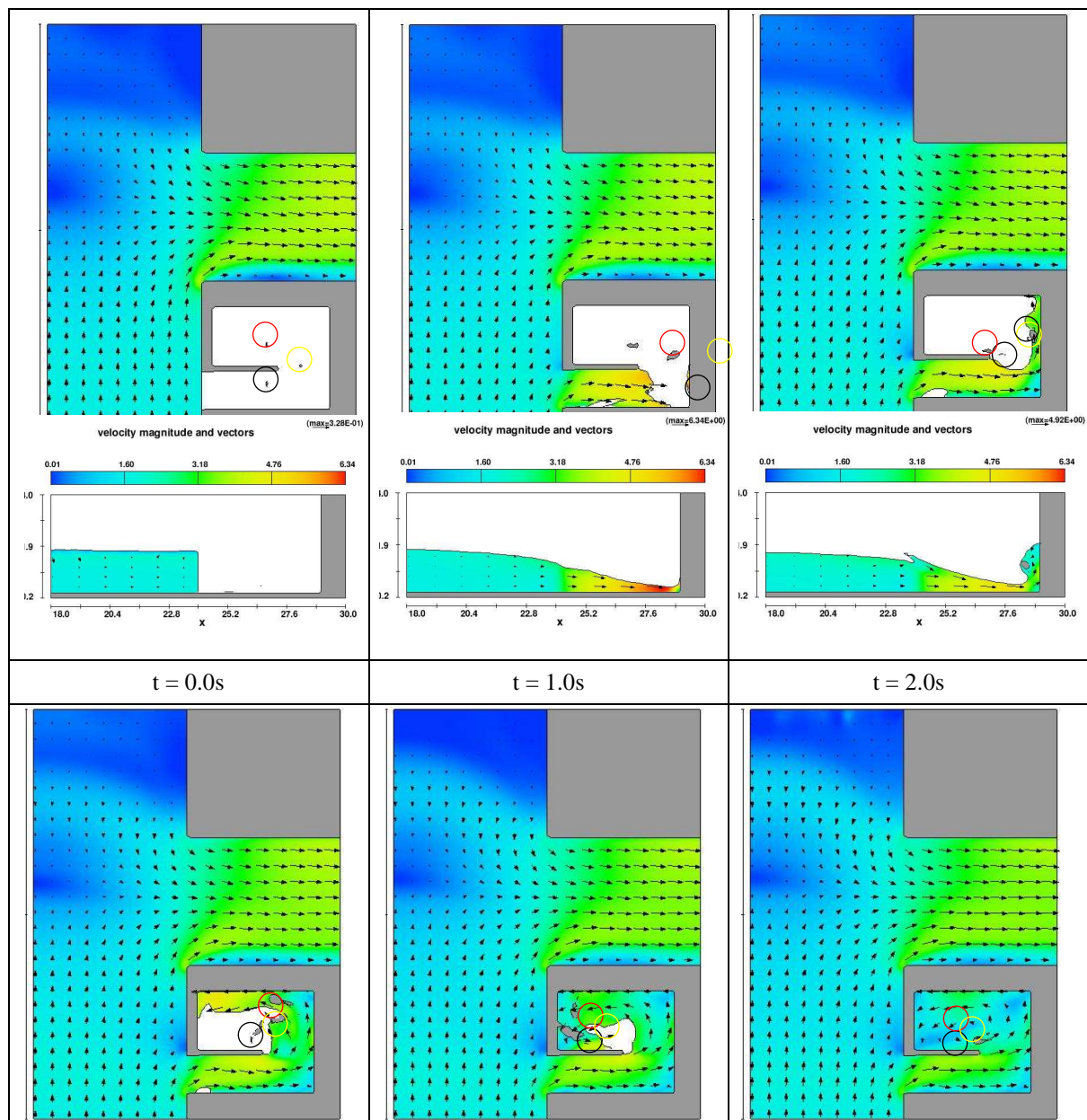
Figura 13 - Configurazione B doppio locale apertura simultanea entrambi portoni

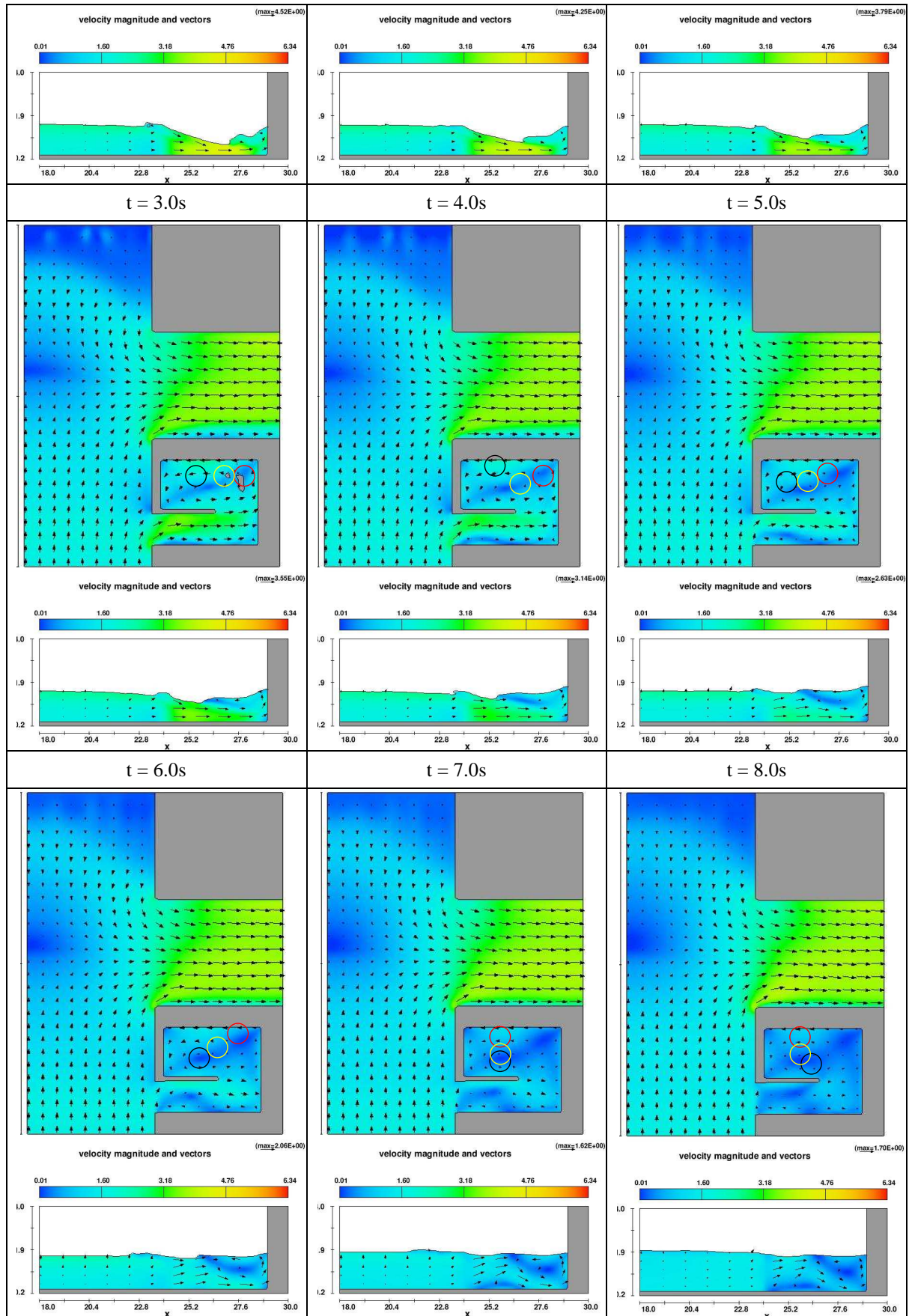
Anche in questa configurazione appare evidente la presenza nel locale di monte negli istanti iniziali di un getto verticale seguito da una onda riflessa, successivamente si evidenzia la formazione di una circolazione diretta dal locale di monte verso quello di valle. La capacità di trascinamento iniziale dovuta all'onda riflessa risulta superiore rispetto a quella connessa alla circolazione che si stabilisce successivamente.

I risultati delle simulazioni indicano pertanto che questa configurazione presenta condizioni idrodinamiche compatibili con i resoconti dell'evento quando la posizione iniziale è posta all'interno del locale di monte.

#### 4.3. Analisi della Configurazione C

I risultati relativi alla Configurazione C sono riportati nella figura 14 anche in tale Configurazione si sono ipotizzate tre possibili posizioni iniziali evidenziate nella figura 14 con tre cerchi di colore differente.





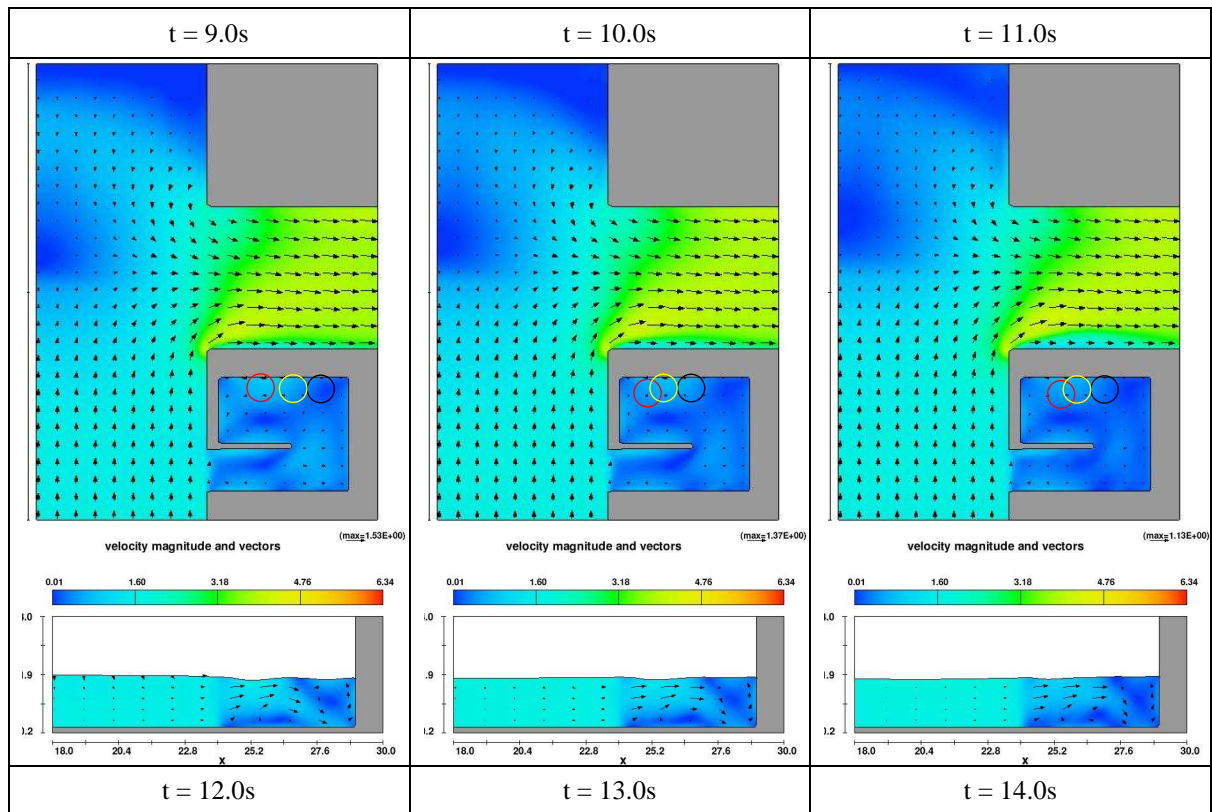


Figura 14 - Configurazione C doppio locale apertura singolo portoni

I risultati delle simulazione relative alla *Configurazione C* indicano che in tale configurazione il flusso risulta diretto verso l'interno del locale di valle e che non si determinano condizioni idrodinamiche compatibili con i resoconti dell'evento.

Sulla base delle simulazioni effettuate sulla tre Configurazioni esaminate si può concludere che in presenza di particolari condizioni geometriche possono verificarsi condizioni idrodinamiche compatibili con i resoconti di quanto accaduto. In particolare si è evidenziata la possibilità che nella fase immediatamente successiva alla irruzione del flusso nel locale si possa generare una onda riflessa in grado di trascinare un corpo al di fuori del locale stesso.

E' sembrato opportuno completare l'analisi cercando di analizzare le eventuali cause che possono avere provocato l'irruzione della corrente all'interno del locale dove si trovava la sventurata donna.

Una prima causa potrebbe essere ricercata nella spinta idrodinamica che ha agito sulle ante del portone e può averne provocato lo sfondamento.

Dai risultati delle simulazioni effettuate con riferimento a piazza Umberto I si è ricavato l'andamento delle pressioni (esprese in metri di colonna d'acqua) lungo la parete su cui si trovano le aperture del bar La Risacca. Il relativo diagramma è riportato in figura 15.

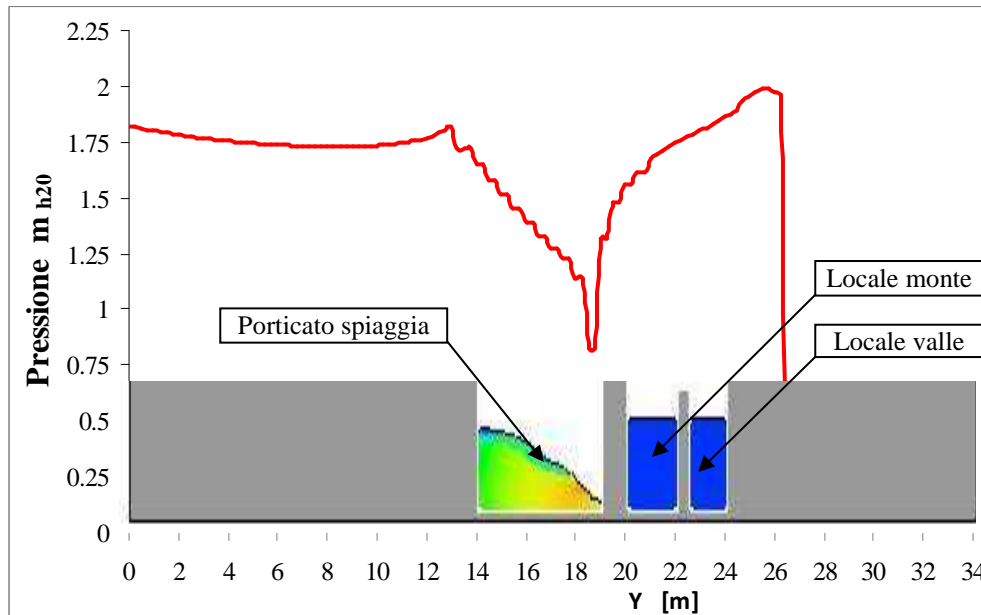


Figura 15 – Distribuzione delle pressioni lungo la parete di valle di piazza Umberto I

L'entità della spinta agente sulle ante rende improbabile che esse possano essere state aperte dall'interno in quanto lo sforzo richiesto per bilanciare la spinta esterna sarebbe di gran lunga superiore a quello che può essere esercitato da una persona.

E' interessante osservare nella figura 15 che la distribuzione della pressione agente lungo la parete dove si trovano le aperture del bar La Risacca non risulta costante e che essa si riduce avvicinandosi al porticato spiaggia. Ne consegue che le ante di chiusura del locale di monte sarebbero state sottoposte ad una spinta superiore rispetto a quella che ha sollecitato il locale di valle.

Non essendo noti i particolari della struttura che reggeva le ante del portone è impossibile stabilire se la spinta determinata con le simulazioni tridimensionali sia stata in grado di provocarne il cedimento, a tal riguardo si può però osservare che tutti gli altri portoni che si affacciano su piazza Umberto I hanno resistito alla spinta idrostatica.

Una possibile alternativa può essere ricercata nella possibilità che una delle oltre 30 autovetture che sono state trascinate dalla corrente abbia urtato il portone provocandone lo sfondamento con la conseguente irruzione della corrente nel locale.

La possibilità che la corrente abbia fatto irruzione attraverso il locale di monte sembra essere confermata dalla figura 16 dove è riportata una fotografia ripresa nella immediatezza dell'evento che mostra come risultino mancanti le ante e la mostra del locale di monte mentre quelle del locale di valle risultano intatte.



Figura 16 – Vista degli ingressi al Bar La Risacca ripresa negli istanti immediatamente successivi all'evento

A tal fine è interessante analizzare il video 6 che riprende quanto accaduto all'interno di piazza Umberto I, in tale video, si individua una autovettura che può avere potenzialmente urtato il portone del locale in cui si trovava la donna. In particolare al minuto 5:32 del video 6 appare una autovettura di colore verde che attraversa il campo di ripresa con notevole velocità.

Nella figura 17 sono riportati alcuni fotogrammi estratti da video 6 che evidenziano la traiettoria dell'autovettura. L'intervallo temporale tra i fotogrammi contenuti nella figura 17 è pari a all'incirca a 3 s. Ipotizzando che l'impatto della autovettura sul portone sia avvenuto 0.5 s dopo l'ultimo fotogramma di figura 17 si determina un tempo di percorrenza complessivo pari a circa 3.5 s cui corrisponde una velocità media pari a circa 5 m/s.



Tale valore di velocità determinerebbe un valore della quantità di moto per l'autovettura che in caso di impatto comporterebbe lo sfondamento delle ante.

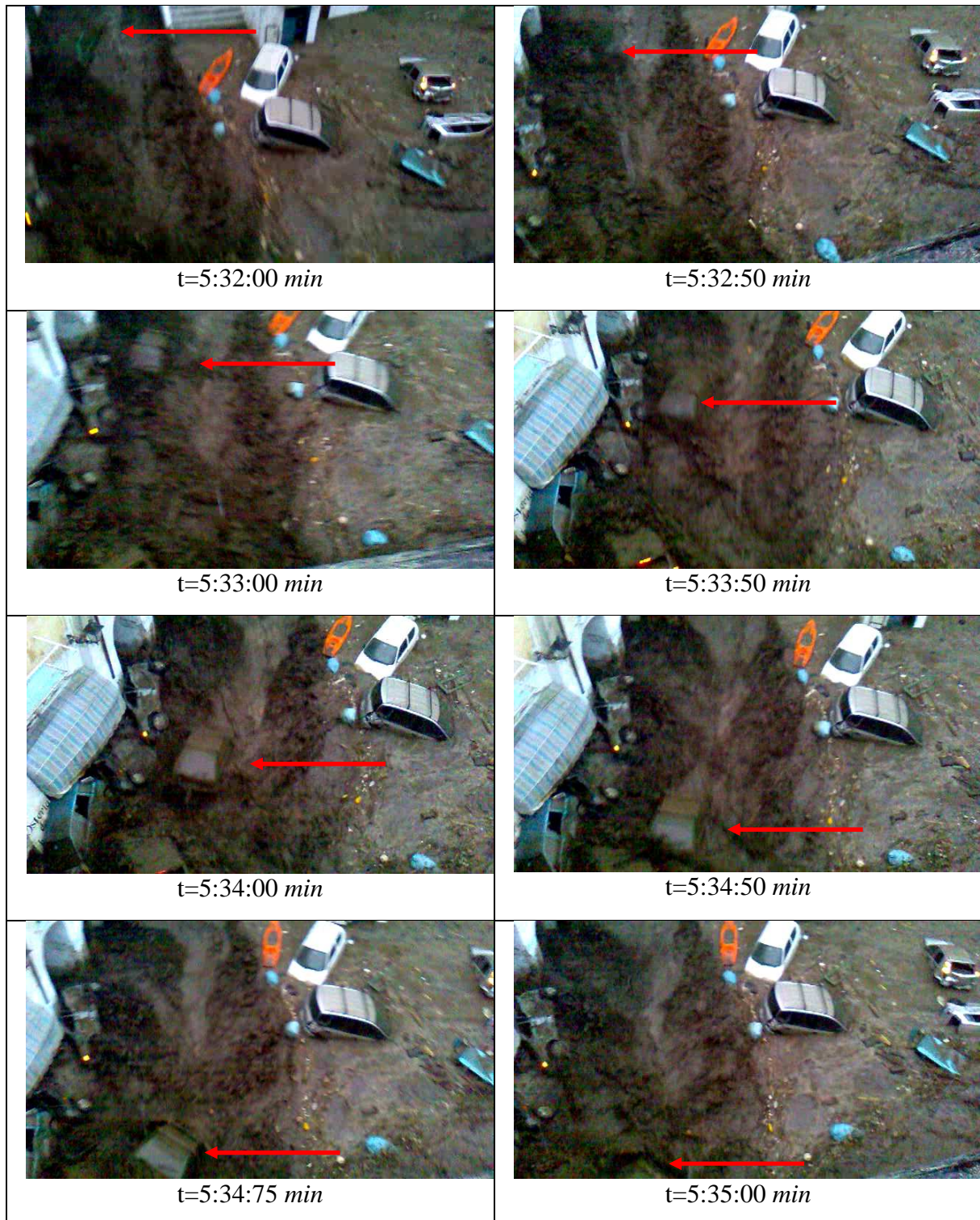


Figura 17 – Sequenza fotogrammi estratti dal video 6 che riprende l'interno di piazza Umberto I (tempo relativo video 6)

Al fine di valutare ulteriormente l'ipotesi che l'irruzione della corrente nel locale sia stata provocata dall'impatto della autovettura evidenziata nella figura 17 si decise di simulare l'interazione tra il flusso ed una sagoma assimilabile a quella di una autovettura.

Il peso complessivo della sagoma è stato posto pari a 9500 *N*, in maniera tale da consentirne il galleggiamento in concordanza con quanto si osserva nel filmato 6. La posizione iniziale della autovettura è stata fatta coincidere con quella ricavabile dal primo fotogramma della figura 17, mentre la velocità iniziale è stata posta pari a quella della corrente.

I risultati della simulazione sono riportati nella figura 18 che contiene le posizioni della autovettura per un intervallo complessivo di 7.0 *s*.

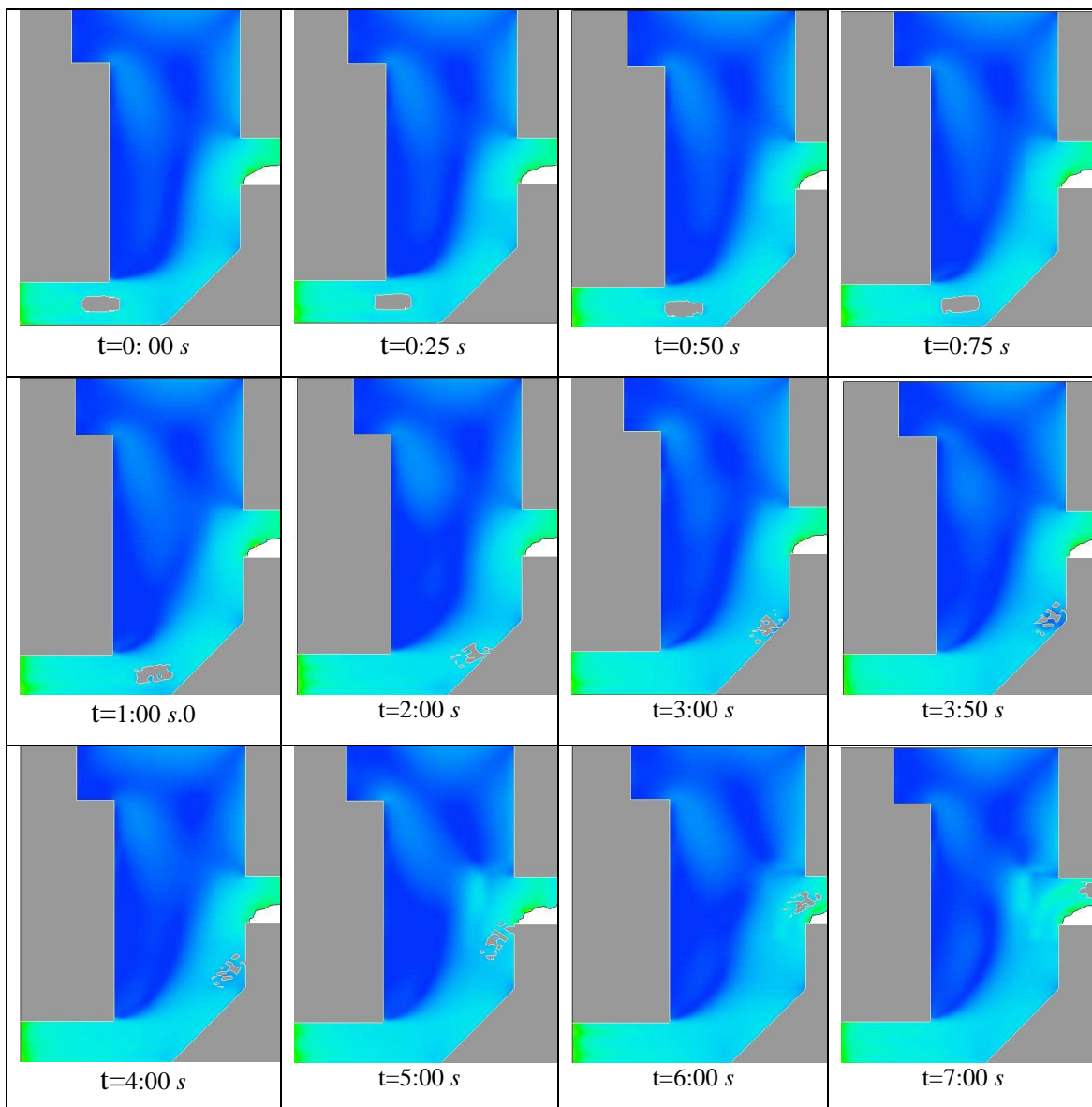


Figura 18– Sequenza risultati simulazione numerica trasporto autovettura

Dalla scansione temporale delle immagini riportate nella figura 18 si evince che il tempo necessario dall'inizio della simulazione fino al presumibile impatto risulta di circa 3.5 s, che risulta a propria volta in buon accordo con le valutazioni effettuate in precedenza.

La simulazione suggerisce inoltre che l'autovettura abbia seguito il corso della corrente e sia uscita attraverso il porticato spiaggia.

Al fine di verificare la verosimiglianza della simulazione effettuata si sono analizzati i filmati disponibili, in particolare il filmato 3, ricercando la presenza dell'autovettura ripresa nella figura 17 tra le autovetture trascinate sulla spiaggia. Tale ricerca ha dato esito positivo come dimostrato dalla figura 19 dove sono riportati due fotogrammi estratti dal filmato 3 in cui l'autovettura in questione appare chiaramente identificabile sulla spiaggia.



Figura 19– Individuazione sulla spiaggia della autovettura presente nella figura 17 (tempo relativo video

3)

In conclusione l'applicazione di una modellazione tridimensionale non-idrostatica a quattro situazioni verificatosi nel corso dell'evento alluvionale che ha interessato l'abitato di Atrani il 9 settembre 2010 ha consentito di raggiungere i seguenti risultati:

- approfondire e confermare la applicabilità di un approccio semplificato per la valutazione della capacità di trasporto dei tratti tombati;
- approfondire e confermare la applicabilità di una modellazione monodimensionale semplificata per la valutazione delle condizioni di moto nella piazza Umberto I;



- confermare la valutazione sulla entità della portata defluente nel tratto tombato mediante la valutazione degli effetti idrodinamici nella zona di mare antistante lo sbocco del tratto tombato stesso;
- analizzare gli aspetti idrodinamici che possono avere giocato un ruolo nella tragica scomparsa della giovane donna presente nel bar La Risacca.