



Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università di Trieste, Piazzale Europa 1, 34127 Trieste

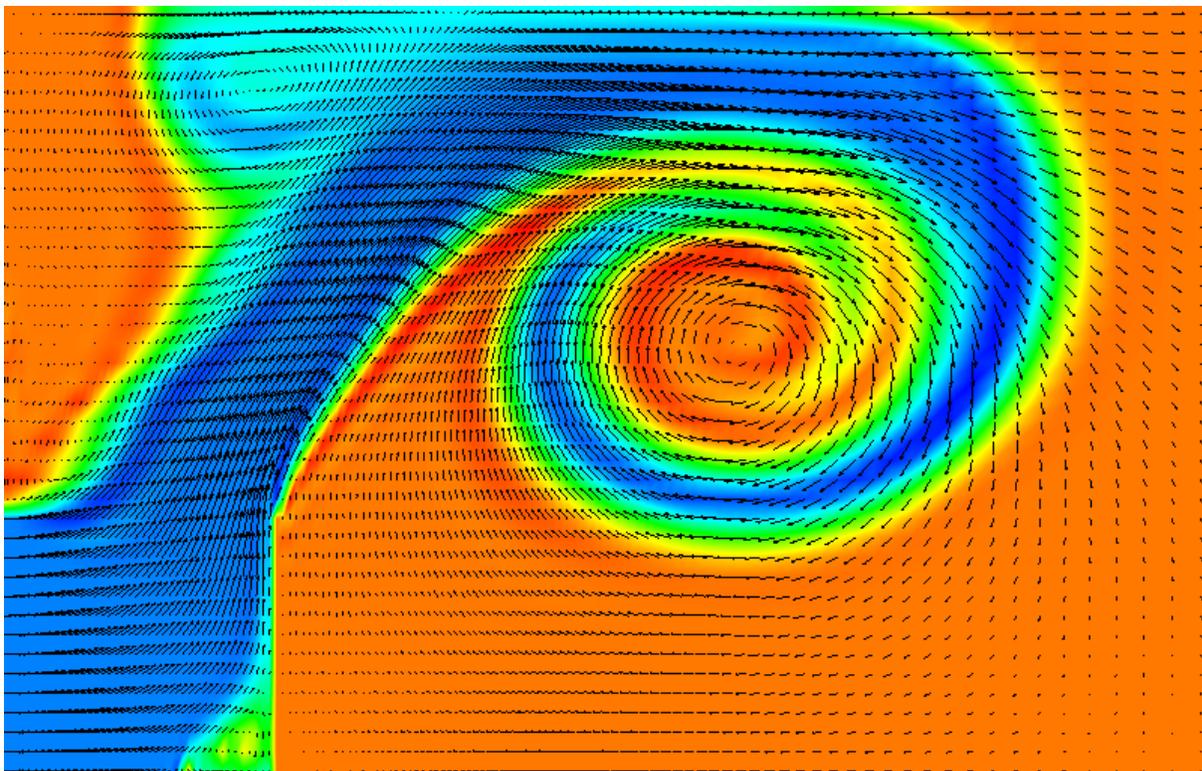
Studio della dispersione e delle capacità erosive del pennacchio termico a valle dell'opera di restituzione dell'impianto di raffreddamento della centrale termica CET-Servola

RELAZIONE FINALE

Data: 02-10- 2009

Studio eseguito per ELETTRA PRODUZIONE S.R.L.

da IE-Fluids, Coordinato dal Prof. Ing. Vincenzo Armenio, DICA, Università di Trieste



INDICE

1. INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA.....	pag. 3
2. PRIMA PARTE: RICERCA DELLA CONFIGURAZIONE OTTIMALE	5
2.1 Griglia di calcolo e condizioni al contorno.....	5
2.2 Configurazione geometrica a paratoia.....	6
2.3 Configurazione geometrica a getto inclinato.....	14
2.4 Studio del transitorio iniziale.....	30
3. SECONDA PARTE: VERIFICA DEL RISPETTO DELLA NORMATIVA.....	34
3.1 Risultati.....	40
4. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE.....	44
5. BIBLIOGRAFIA.....	46

1. INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA

Il presente elaborato si riferisce alla seconda fase dello studio sulle modifiche da apportare al progetto eseguito da Prof. Ing. V. Fiorotto e da Ing. D. Russo (nel seguito Progetto-FR), in relazione all'impianto di restituzione di acqua calda che proviene dall'impianto di raffreddamento della centrale elettrica CET-Servola di Elettra Produzione S.r.l. (nel seguito ELETTRA).

Per i dettagli di tale progetto di riferimento, si rimanda alla relazione intermedia [1], relativa alla prima fase del lavoro.

La presente relazione è mirata ad illustrare i risultati definitivi dello studio: nella prima parte sarà descritto il processo di individuazione della configurazione di scarico ottimale, ai fini della minimizzazione o eventuale eliminazione dei fenomeni erosivi; la seconda parte sarà invece mirata a verificare, sulla configurazione definitiva, il rispetto della normativa vigente sugli scarichi a mare (decreto-legge 9 ottobre 1993, n. 408 e Legge 6 dicembre 1993, n. 502), secondo cui la temperatura dell'acqua non deve essere superiore a 3 °C rispetto a quella del bacino idrico ricevente a 1000 metri di distanza dallo scarico stesso.

Nella precedente fase di studio erano state confrontate due tipologie di configurazioni geometriche, relative a differenti caratteristiche della parte terminale del cassone di scarico.

La prima configurazione era ottenuta inclinando la parte terminale del cassone di un angolo di 30° rispetto all'orizzontale; la seconda configurazione prevedeva la rimozione della parte superiore del condotto terminale orizzontale e la presenza di una paratoia verticale posta ad un metro di distanza dalla parete di scarico. Le due tipologie sono mostrate nella figura 1.

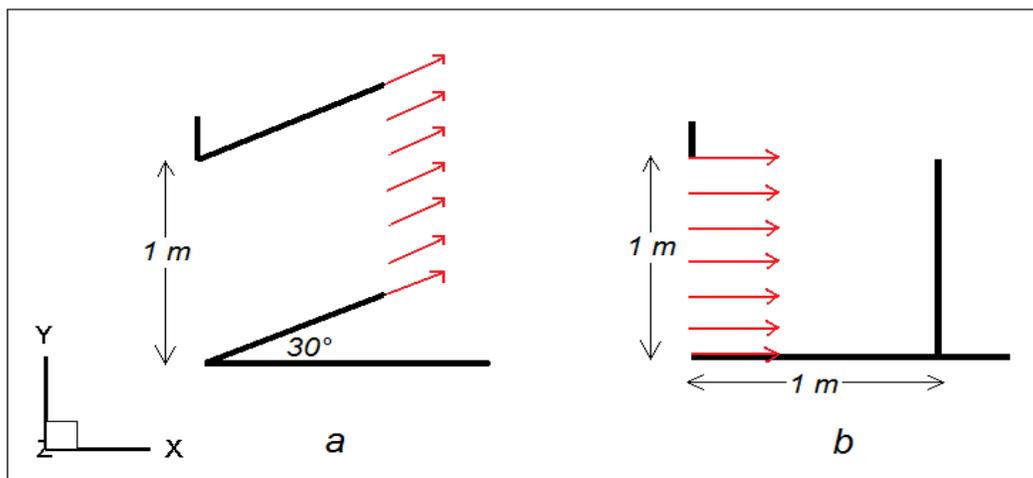


Figura 1 - Modelli schematici delle due classi di configurazioni in esame: a) configurazione a getto inclinato; b) configurazione con paratoia verticale.

I risultati ottenuti nella parte preliminare dello studio hanno rivelato una netta superiorità della classe a getto inclinato, ai fini della minimizzazione dei fenomeni erosivi. Tali risultati non erano stati considerati comunque conclusivi, in quanto potevano essere legati alle specifiche configurazioni provate.

Nella fase successiva di ricerca della configurazione ottimale, dunque, si è proceduto nelle seguenti direzioni:

1. Sono stati considerati altri casi della tipologia con paratoia (fig. 1b), variando l'altezza della luce di efflusso e conseguentemente la velocità di efflusso dell'acqua calda, per verificare che i risultati poco soddisfacenti non fossero correlati alla specifica configurazione adottata nella prima fase;
2. Riguardo alla configurazione a getto inclinato, (fig.1a), sono stati considerati differenti angoli di inclinazione del getto, rispettivamente superiori ed inferiori al valore (30°) studiato nella fase preliminare dello studio.

La figura 2 riporta le due ulteriori configurazioni geometriche considerate in relazione alla configurazione con paratoia. La figura 3 riporta, per la configurazione a getto inclinato, le 4 ulteriori differenti configurazioni geometriche studiate, ottenute variando l'angolo di inclinazione del getto e lasciando inalterata l'altezza della luce di efflusso, ovvero la velocità di efflusso dell'acqua.

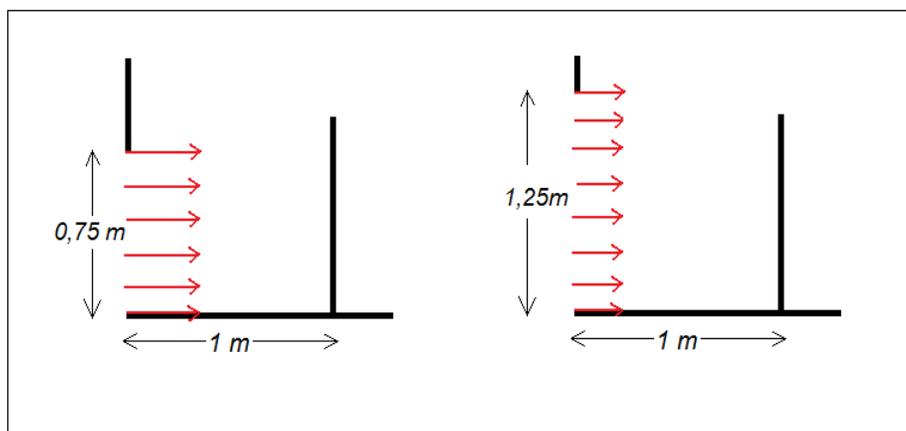


Figura 2 - Configurazioni con paratoia verticale. Altezza della paratoia pari a 1 m, altezza della luce di efflusso pari a 0.75 m e 1.25 m.

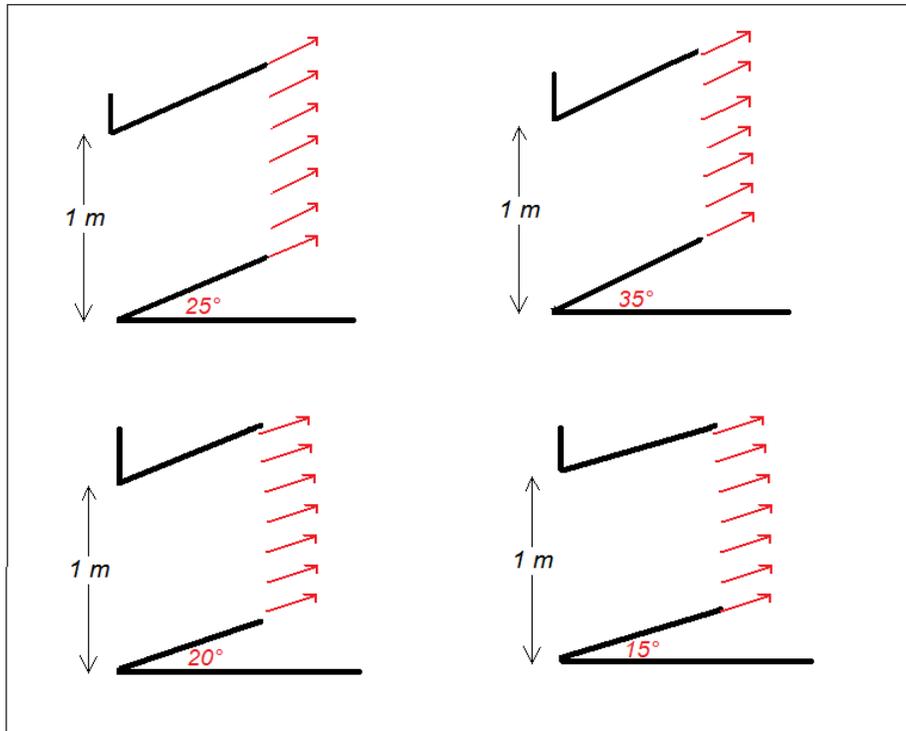


Figura 3 - Configurazioni a getto inclinato. Altezza della luce di efflusso pari a 1 m, angoli di inclinazione pari a 25°, 35°, 20° e 15°.

2. RICERCA DELLA CONFIGURAZIONE OTTIMALE

La prima parte della presente relazione è finalizzata alla determinazione delle condizioni di emissione ottimali nei confronti dei processi di erosione. Il caso reale è stato semplificato ai fini di una maggiore facilità di calcolo e velocità di esecuzione delle simulazioni numeriche.

Le approssimazioni sono state adottate nell'ottica di conservatività.

In altre parole, la configurazione ottimale ottenuta con le ipotesi semplificative discusse nel dettaglio nella relazione intermedia [1], una volta inserita nel contesto reale avrà caratteristiche di diffusione del getto migliori rispetto a quanto valutato nelle simulazioni numeriche nei riguardi dei processi erosivi.

2.1 Griglia di calcolo e condizioni al contorno

Per la descrizione dettagliata del dominio di calcolo e delle condizioni al contorno utilizzate nelle simulazioni si rimanda alla precedente relazione intermedia [1]. Si richiama solamente il fatto che nelle simulazioni presenti si considera l'emissione presente lungo tutta la direzione trasversale del dominio, con una portata volumetrica per metro di larghezza pari a 2416 m³/h, corrispondenti a 23,800 m³/h attesi allo scarico. Tale valore è leggermente inferiore al valore molto conservativo di

24,000 m³/h considerato in Progetto-FR, e superiore al valore di funzionamento reale della centrale, pari a 21,800 m³/h.

Nella figura 4 si riporta una rappresentazione grafica del contorno della griglia, con le relative dimensioni. Il modello matematico LES-COAST utilizzato per le simulazioni è discusso in [1].

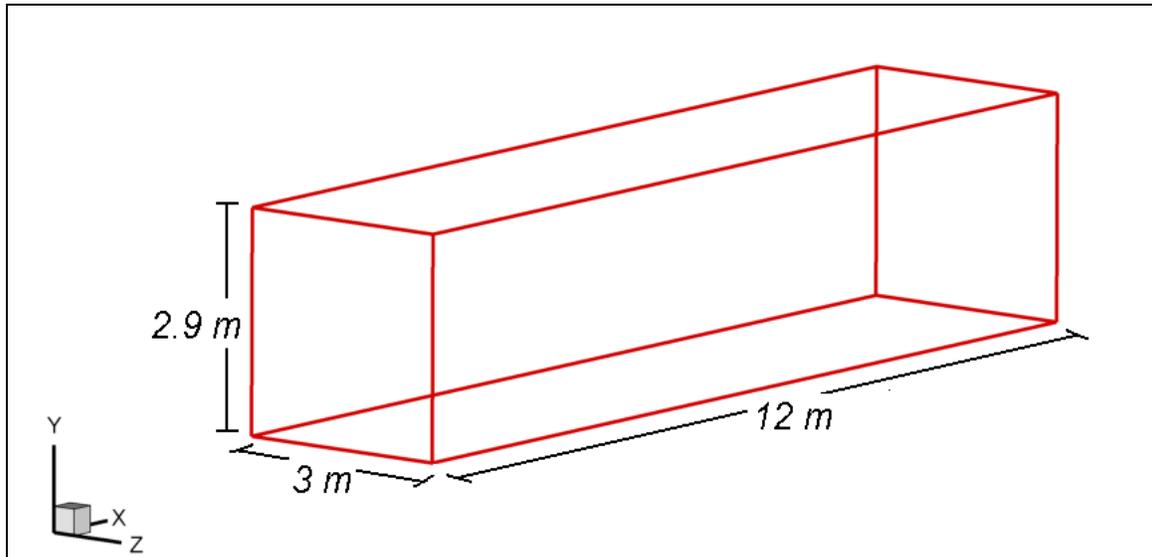


Figura 4 - Dominio di calcolo utilizzato nelle simulazioni numeriche.

2.2 Configurazione geometrica a paratoia

Nel presente paragrafo verranno descritti i risultati delle simulazioni numeriche relativamente alle due nuove configurazioni a paratoia analizzate. Le condizioni di efflusso e le caratteristiche geometriche delle due configurazioni sono le seguenti:

1. Il getto viene emesso dalla parete $x=0$ lungo un'altezza totale di 0.75 m, che rappresenta la luce di efflusso e viene deviato da un ostacolo costituito da una paratoia verticale di altezza pari a 1 m posta a distanza di 1 m dalla luce di efflusso;
2. il getto viene emesso dalla parete $x=0$ lungo un'altezza totale di 1.25 m che rappresenta la luce di efflusso e viene deviato da un ostacolo costituito da una paratoia verticale di altezza pari a 1 m posta a distanza di 1 m dalla luce di efflusso.

I parametri computazionali di queste simulazioni sono identici a quelli considerati per la configurazione a paratoia verticale studiata nella relazione intermedia [1] e sono ivi riportati.

Per questa tipologia di configurazione geometrica, nel caso specifico di scarico alto 1 m, le simulazioni avevano rivelato fenomeni di erosione decisamente inferiori a quelli ottenuti nel Progetto-FR, seppure piuttosto marcati ed estesi per una parte notevole del dominio. Al fine di verificare che tali fenomeni non fossero legati al singolo caso, ma piuttosto alla classe di configurazione, sono state studiate le due ulteriori geometrie a paratoia, descritte sopra.

La prima di tali configurazioni, caratterizzata da una luce di efflusso di altezza pari a 0.75 m, dal momento che la portata in ingresso deve necessariamente restare invariata, ha una componente orizzontale della velocità di efflusso pari a:

$$u_e = 0.90 \text{ m/s lungo l'asse } x$$

La componente verticale è nulla in corrispondenza alla luce di efflusso, ma crescerà rapidamente avvicinandosi alla paratoia, dove il getto viene deviato per effetto dell'ostacolo.

Dalla figura 5 riportata di seguito, si evince un quadro qualitativo delle correnti sviluppatesi a regime all'interno del dominio in esame. Va tenuto presente che le linee di corrente sono ottenute effettuando la media dei valori di velocità nel tempo e sulla direzione z , lungo la quale il campo di moto è omogeneo.

Nel grafico si possono distinguere tre regioni distinte: la zona occupata dal getto, deviato verso la superficie marina per opera della paratoia e confinato in una regione piuttosto limitata, ragione per cui, come sarà evidenziato dai diagrammi successivi, saranno registrati alti valori di velocità; una seconda e ampia zona di ricircolo in senso orario, che occupa la maggior parte del dominio, sia in altezza sia longitudinalmente, e che comprende le correnti effettivamente responsabili dell'erosione sul fondale; infine una terza zona, di estensione piuttosto limitata, in corrispondenza dell'angolo soprastante lo scarico, caratterizzata da un ricircolo in direzione antioraria. L'ulteriore vortice individuato nel precedente studio nel caso della configurazione a paratoia, collocato a ridosso dell'ostacolo stesso è in questa nuova geometria di dimensioni molto più ridotte e diretto in senso antiorario.

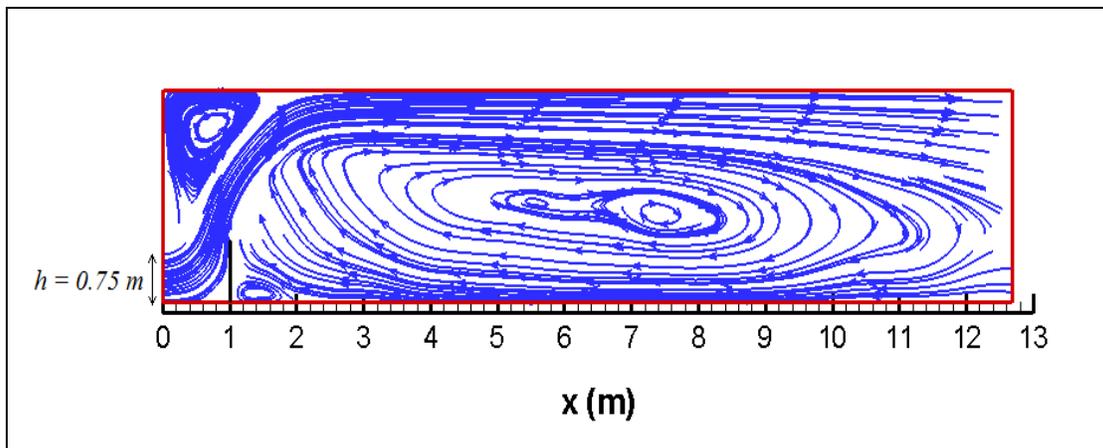


Figura 5 - Configurazione geometrica con paratoia verticale alta 1 m e altezza della luce di efflusso pari a 0.75 m: mappa spaziale delle linee di corrente del moto medio.

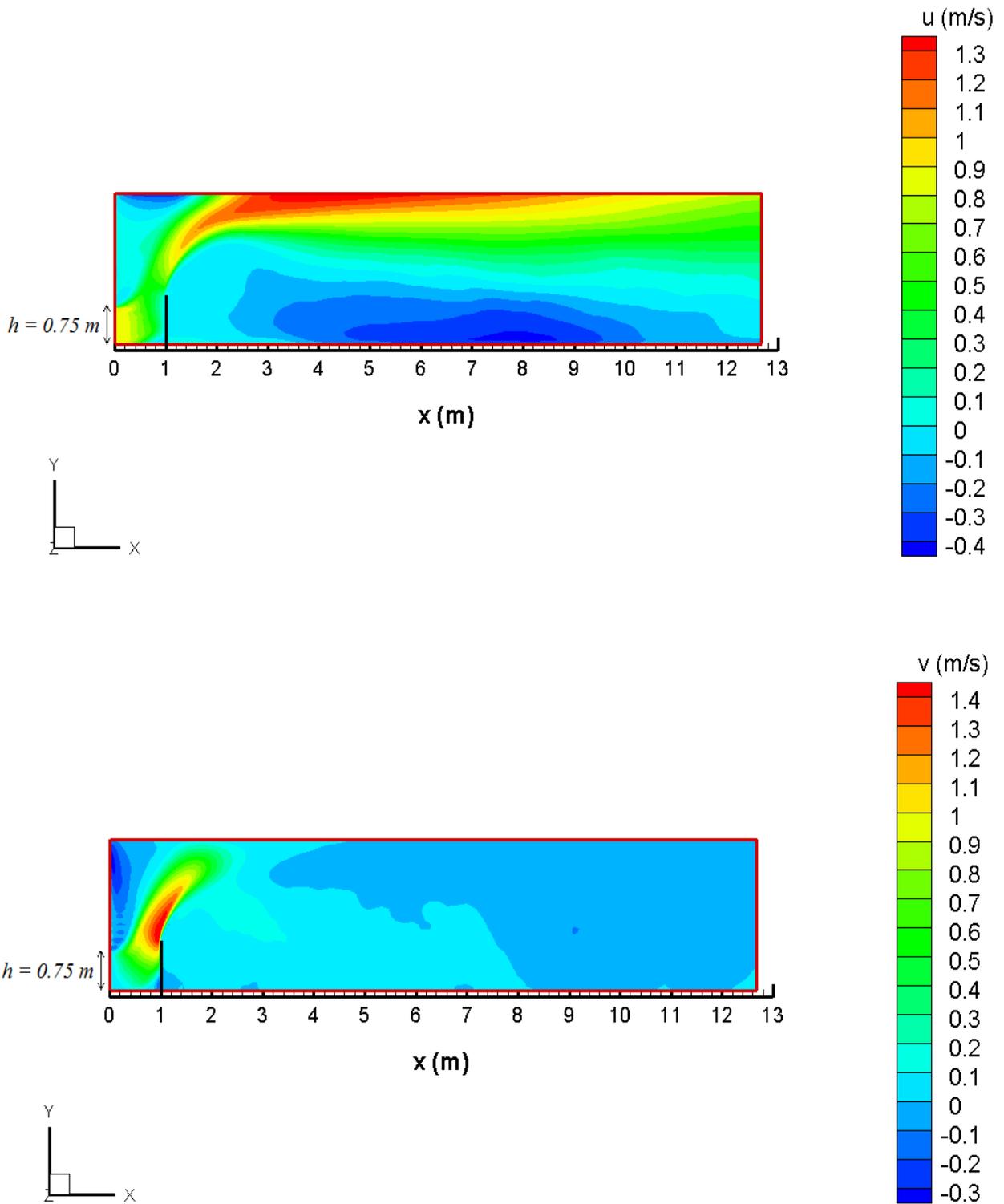


Figura 6 - Configurazione geometrica con paratoia verticale alta 1 m e altezza della luce di efflusso pari a 0.75 m: mappe spaziali delle componenti di velocità orizzontale (pannello superiore) e verticale (pannello inferiore).

In figura 6 sono riportati i valori della componente longitudinale u (pannello superiore) e verticale v (pannello inferiore) del campo di velocità. Si evidenziano valori positivi di u (colori caldi) in corrispondenza della regione occupata dal getto, che raggiungono un massimo intorno a 1.3 m/s, in corrispondenza della superficie libera. Al contrario, nella metà inferiore del dominio e nell'angolo sopra lo scarico la componente orizzontale assume valori negativi (colori freddi), con intensità massima in corrispondenza del fondale. Da tale osservazione è lecito presupporre lo sviluppo di fenomeni erosivi piuttosto intensi. Per quanto riguarda la componente verticale, si possono notare valori positivi elevati (fino a 1.4 m/s) confinati in una stretta zona in corrispondenza dell'estremità superiore dell'ostacolo e rapidamente decrescenti nello spazio circostante. Coerentemente con le strutture vorticosi individuate nel diagramma delle linee di corrente, i valori negativi di v si hanno in due regioni distinte: nella parte destra del dominio, sull'intera altezza della colonna d'acqua e in corrispondenza della parete sinistra, al di sopra dello scarico.

Nel secondo caso analizzato di scarico con paratoia verticale, la luce di efflusso è stata assunta di altezza pari a 1.25 m, superiore rispetto alla dimensione considerata nella prima fase del lavoro. Considerato che la portata di efflusso è costante, la componente orizzontale della velocità di efflusso sarà minore rispetto al caso precedente e pari a :

$$u_e = 0.54 \text{ m/s lungo l'asse } x$$

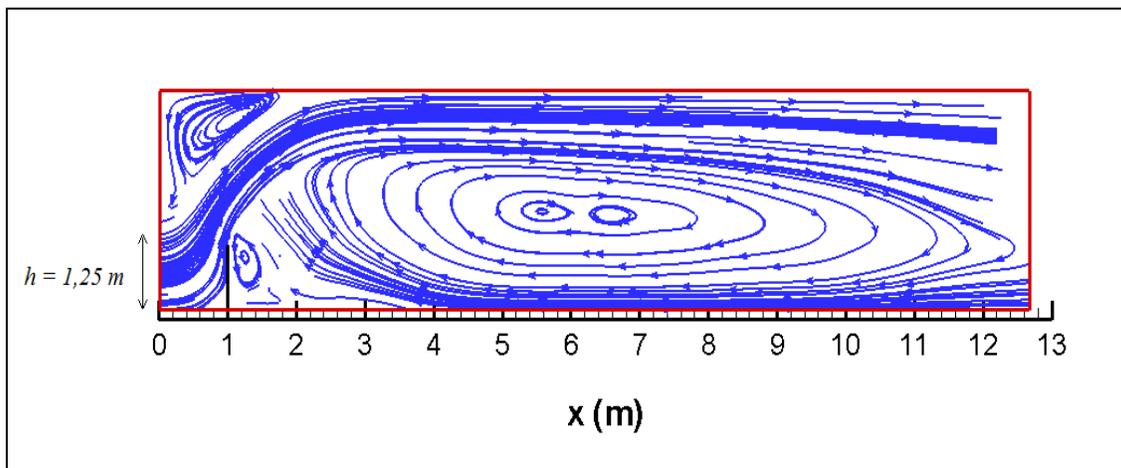


Figura 7 - Configurazione geometrica con paratoia verticale alta 1 m e altezza della luce di efflusso pari a 1.25 m: mappa spaziale delle linee di corrente del moto medio.

Nella figura 7 è riportata la mappa delle linee di corrente per il moto medio. Si nota un quadro complessivo analogo al caso precedente, si possono infatti distinguere le stesse regioni di flusso.

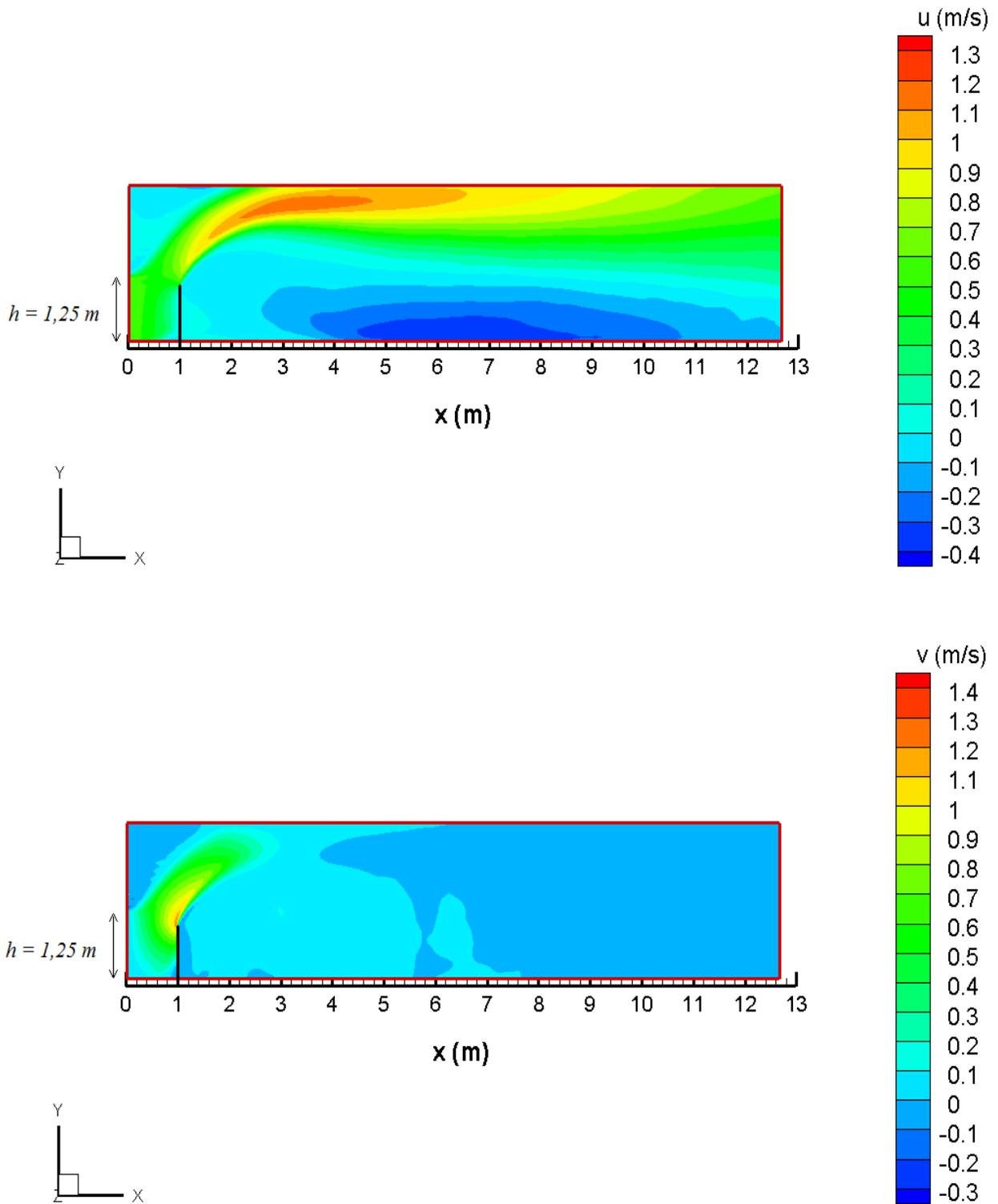


Figura 8 - Configurazione geometrica con paratoia verticale alta 1 m e altezza luce di efflusso pari a 1.25 m: mappe spaziali delle componenti di velocità orizzontale (pannello superiore) e verticale (pannello inferiore).

L'unica differenza sostanziale riguarda la zona occupata dal getto che, data la maggiore sezione di scarico, risulta leggermente più estesa lungo la verticale, a discapito della regione del ricircolo centrale che ruota in senso orario.

Nella figura 8 sono rappresentate le componenti del campo di velocità. Da un confronto con i diagrammi relativi al caso precedente, si nota immediatamente come le intensità siano ora minori: il massimo valore positivo per u , osservato sempre in prossimità della superficie libera marina, è intorno a 1.1 m/s, mentre il massimo negativo, nella regione vicina al fondale, è di circa 0.3 m/s. Ciò porta a prevedere che in questa geometria i fenomeni erosivi saranno meno intensi rispetto al caso precedente. Un'analoga riduzione delle intensità si registra anche per la componente verticale.

Si analizzano adesso i fenomeni erosivi associati alle condizioni di scarico considerate nella presente sezione. Per una descrizione esaustiva del metodo di analisi applicato per lo studio di tali fenomeni, si veda la relazione intermedia [1] e la relazione finale dello studio precedente [2].

Al fine di valutare la potenziale erosione indotta dalle geometrie studiate, riportiamo: 1) l'andamento longitudinale del rapporto $\tau(x)/\tau_c$, ovvero tra lo sforzo tangenziale al fondo e lo sforzo critico oltre il quale si ha risospensione di sedimento; 2) la portata di sedimento rimosso per unità di tempo e di superficie, ovvero la velocità di scavo V_s , dimensionalmente espressa in [m/h]. Le due grandezze sono riportate in funzione della distanza dalla sezione di scarico.

I diagrammi nella figura 9 sono relativi alla configurazione a paratoia con scarico alto 0.75 m.

In entrambi i casi l'erosione sembra essere piuttosto marcata, con valori del rapporto $\tau(x)/\tau_c$ nettamente superiori all'unità su un'estesa regione del dominio. In particolare, come già previsto dall'analisi dei campi di velocità, nella configurazione con altezza della luce di scarico pari a 0.75 m, a causa della maggiore velocità di efflusso, $\tau(x)/\tau_c$ raggiunge valori più elevati rispetto al caso con altezza della luce di scarico pari a 1.00 m, con un valore massimo pari a circa 6.5, che porta a una velocità di scavo massima di circa 0.12 m/h.

Al contrario, i fenomeni erosivi diminuiscono nel caso di altezza di scarico pari a 1.25 m, (figura 10) dove il massimo valore di $\tau(x)/\tau_c$ è pari a circa 4.5 e la velocità massima di scavo raggiunge il valore di 0.06 m/h, circa la metà di quella ottenuta con altezza della luce di efflusso pari a 0.75 m.

In conclusione, questa parte dello studio ha mostrato che la configurazione geometrica con paratoia verticale, pur riducendo notevolmente i fenomeni erosivi rispetto alla configurazione a scarico orizzontale (Progetto-FR) non è in grado di ridurli a valori accettabili. Inoltre tale configurazione, deviando in maniera decisa il getto verso l'alto, potrebbe produrre fenomeni turbolenti in corrispondenza della superficie marina e indurre nuovamente formazioni di schiume. Per i motivi citati si è deciso di abbandonare definitivamente la configurazione a paratoia e focalizzare l'attenzione sulla configurazione a getto inclinato.

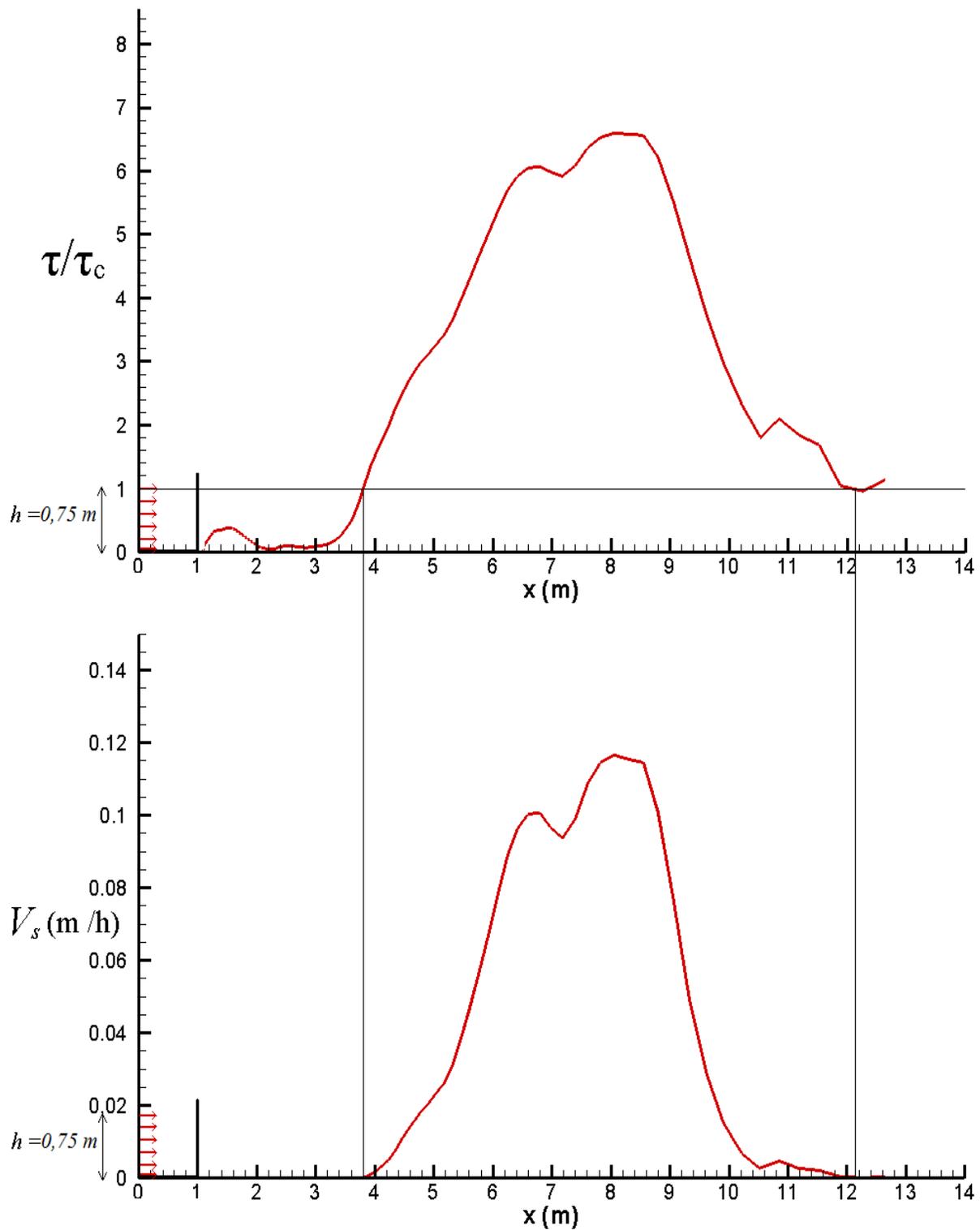


Figura 9 - Configurazione geometrica con paratoia verticale alta 1 m e altezza luce di efflusso pari a 0.75 m: andamento longitudinale del rapporto $\tau(x)/\tau_c$ (pannello superiore); distribuzione longitudinale della portata volumetrica di sedimento potenzialmente rimovibile, per unità di superficie (pannello inferiore).

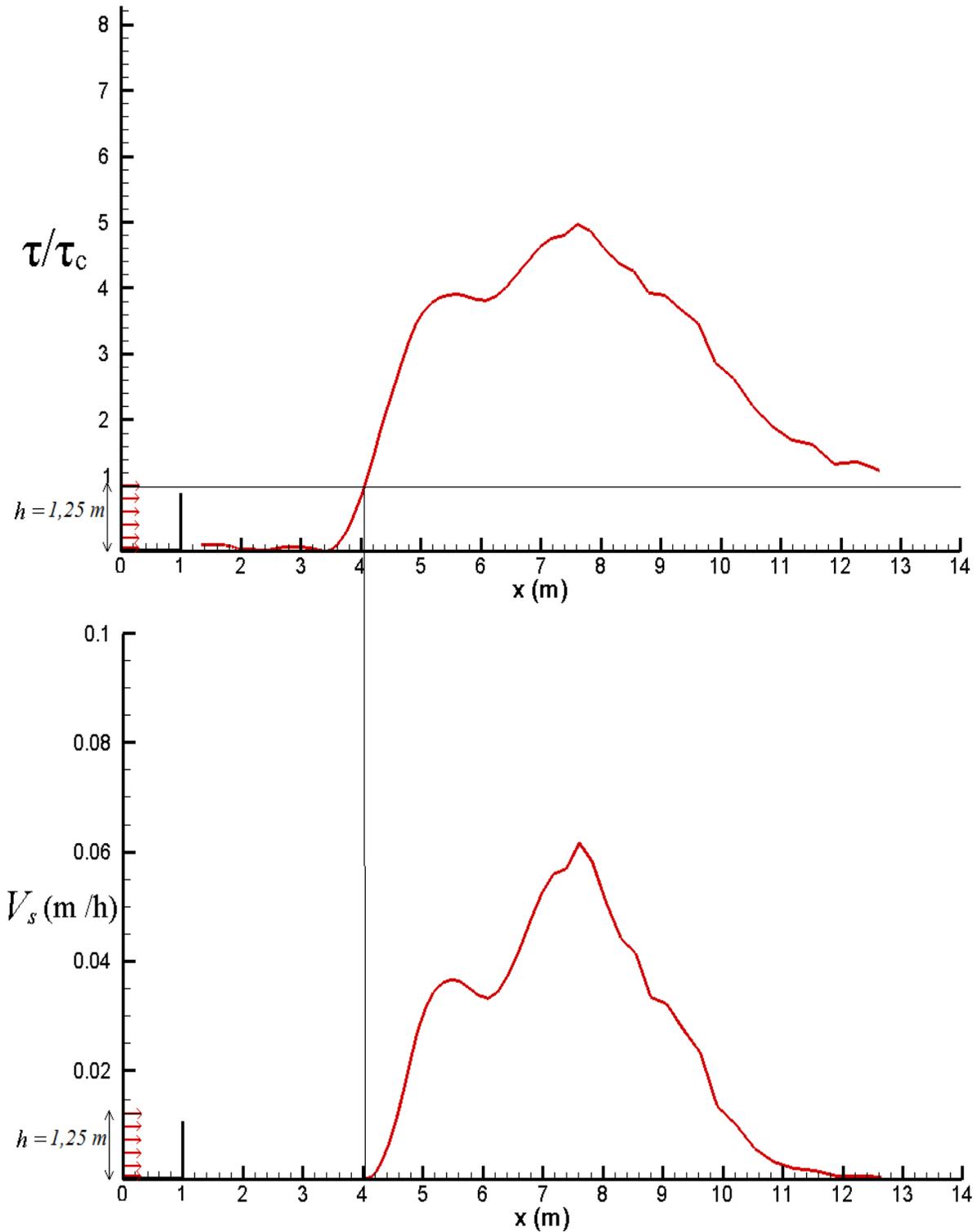


Figura 10 - Configurazione geometrica con paratoia verticale alta 1 m e altezza luce di efflusso pari a 1.25 m: andamento longitudinale del rapporto $\tau(x)/\tau_c$ (pannello superiore); distribuzione longitudinale della portata volumetrica di sedimento potenzialmente rimovibile, per unità di superficie (pannello inferiore).

2.3 Configurazione geometrica a getto inclinato

Questa seconda tipologia di configurazione prevede l'inclinazione verso l'alto della parte terminale del condotto secondo un certo angolo rispetto all'asse x . Nella prima fase di lavoro era stato studiato il caso con un angolo di inclinazione pari a 30° e si era riscontrata una netta superiorità di questa geometria rispetto alla soluzione con paratoia ai fini della minimizzazione dell'erosione. Quindi si è deciso di proseguire con la ricerca delle condizioni ottimali ripetendo lo studio con differenti valori dell'angolo di inclinazione.

Dapprima sono state considerate due inclinazioni, rispettivamente pari a 25° e 35° , valori leggermente al di sotto ed al di sopra rispetto al valore già sperimentato.

L'altezza della luce di efflusso rimane invariata e pari a 1 m, dunque la variazione dell'angolo di inclinazione produce una corrispondente variazione della sola componente verticale della velocità del getto. Nel caso di un angolo di 25° , le componenti della velocità di efflusso sono le seguenti:

$$u_e = 0,67 \text{ m/s lungo l'asse } x$$

$$v_e = 0,31 \text{ m/s lungo l'asse } y$$

In figura 11 sono rappresentate le linee di corrente del moto medio, a regime di moto pienamente sviluppato.

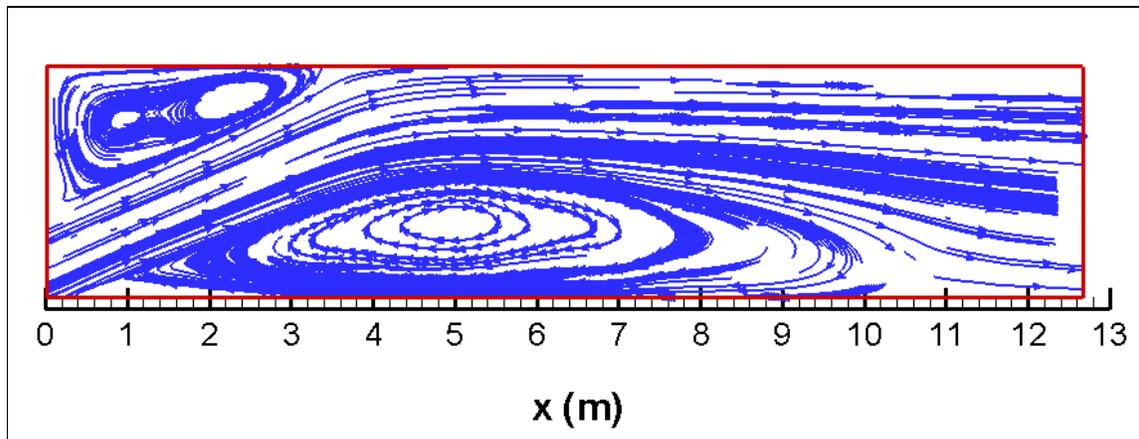


Figura 11 - Configurazione geometrica con getto inclinato, angolo 25° : mappa spaziale delle linee di corrente del moto medio.

La principale differenza rispetto alla configurazione con paratoia sta nel fatto che il getto inclinato tende ad allargarsi in maniera naturale. Di conseguenza, a parità di portata, le massime velocità raggiunte sono generalmente più ridotte. Si può infatti osservare dall'analisi della figura come il flusso dello scarico vada ad occupare il dominio in esame per circa metà della sua estensione verticale.

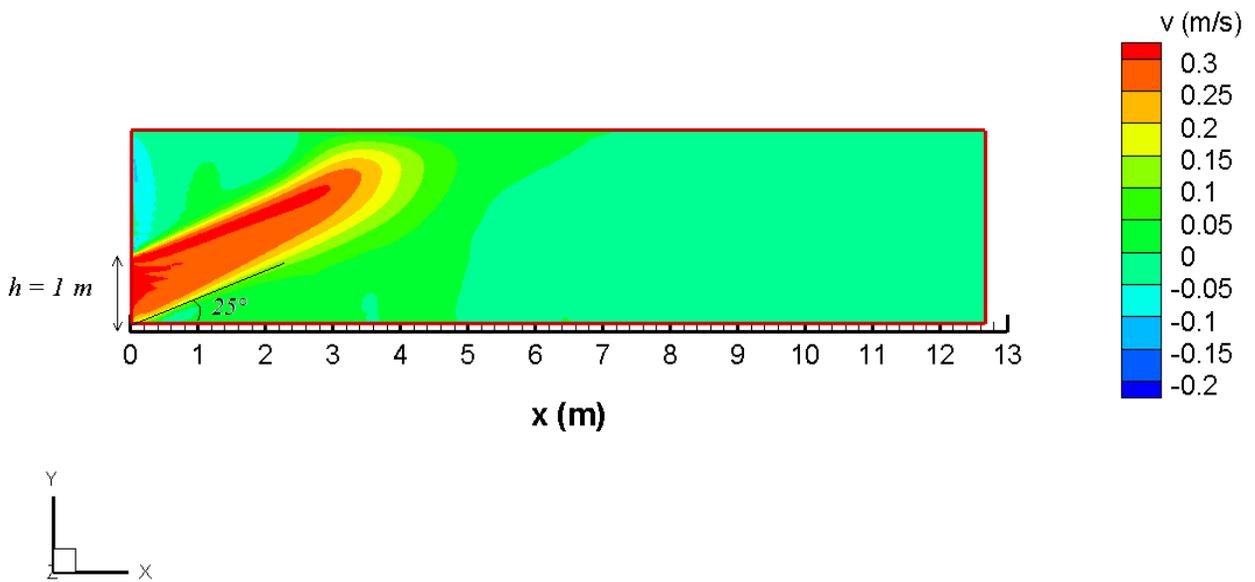
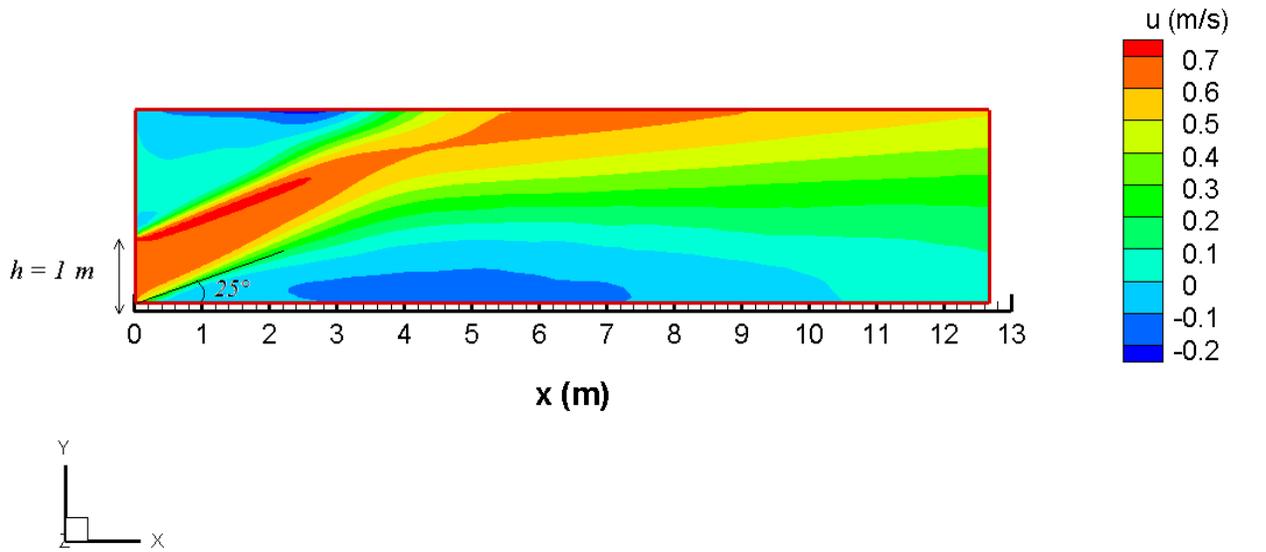


Figura 12 - Configurazione a getto inclinato, angolo 25° : mappe spaziali delle componenti di velocità orizzontale (pannello superiore) e verticale (pannello inferiore).

Si possono anche in questo caso individuare le principali regioni di ricircolo: quello orario e molto ampio, che si estende a valle della sezione di scarico al di sotto del getto stesso, e quello antiorario, di dimensioni contenute e collocato al di sopra dell'immissione del getto nel bacino.

In figura 12 sono riportate le mappe spaziali delle componenti di velocità: l'intervallo di valori va da -0.2 m/s a 0.7 m/s, sostanzialmente inferiore a quanto osservato nei casi di configurazione a paratoia.

Si nota come la zona occupata dal getto sia caratterizzata da valori positivi della velocità longitudinale (componente u), che raggiunge il massimo, pari a circa 0.7 m/s, in corrispondenza della parte più alta dello scarico. I valori di velocità registrati in corrispondenza della superficie marina sono dell'ordine di 0.6 m/s, sostanzialmente inferiori a quelli del caso a paratoia. Le regioni di ricircolo, evidenziate da colori freddi, mostrano valori negativi della componente u con intensità pari a circa -0.2 m/s in corrispondenza del fondo.

La componente verticale assume i valori massimi e positivi, corrispondenti a quelli del flusso entrante, in prossimità dello scarico, mentre nella restante parte del dominio ha generalmente segno negativo e bassa intensità, intorno a 0.05 m/s. In generale i valori di velocità sono inferiori a quanto osservato nel caso di configurazione a paratoia, sia in corrispondenza della superficie marina che del fondo.

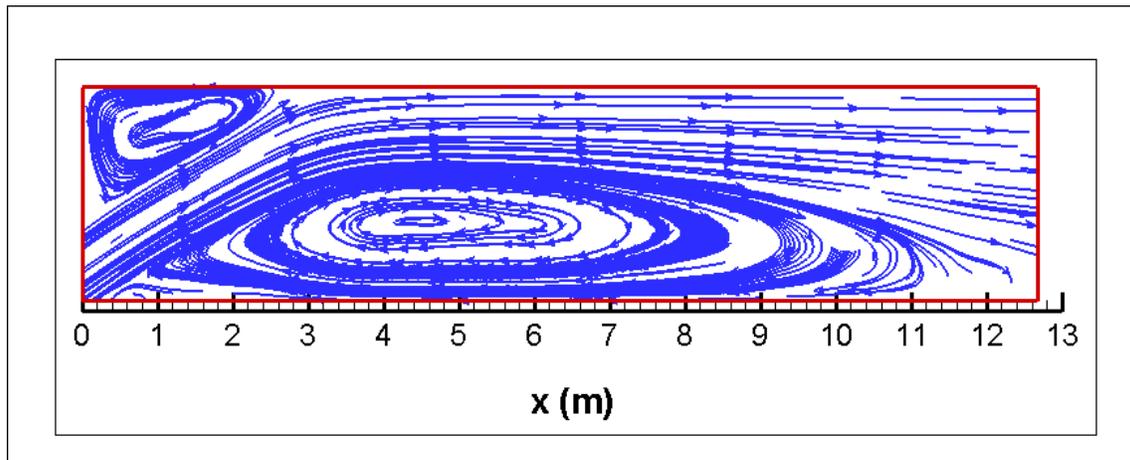


Figura 13 - Configurazione geometrica con getto inclinato, angolo 35°: mappa spaziale delle linee di corrente del moto medio.

L'inclinazione del getto con un angolo di 35° è determinata dalle seguenti componenti della velocità di efflusso:

$$u_e = 0,67 \text{ m/s lungo l'asse } x$$

$$v_e = 0,47 \text{ m/s lungo l'asse } y$$

Le caratteristiche del moto medio in questa configurazione (figura 13) si differenziano da quelle del caso precedente per lo sviluppo del getto in direzione verticale, maggiormente confinato in prossimità della superficie, e per l'estensione orizzontale delle due zone di ricircolo.

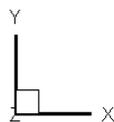
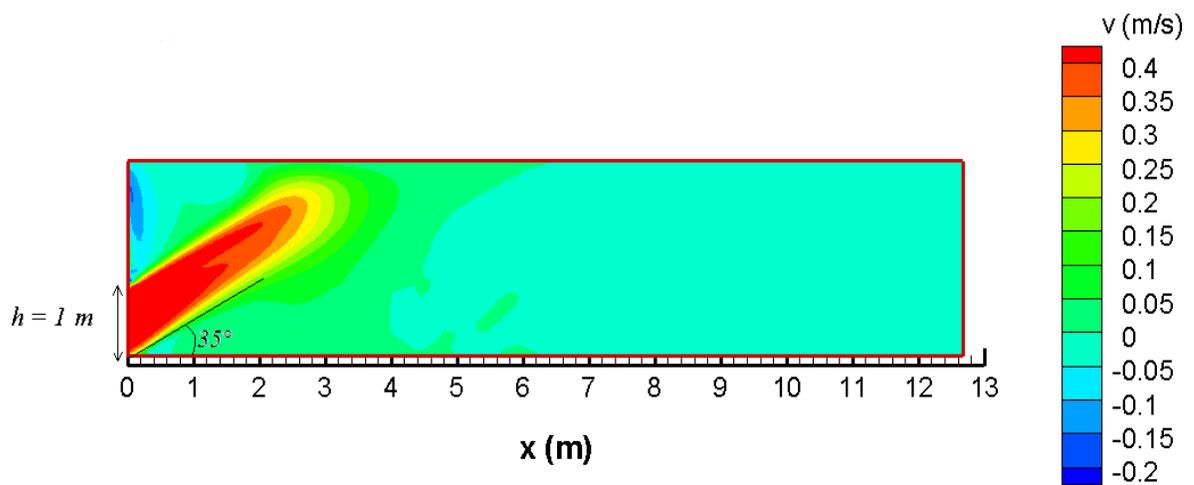
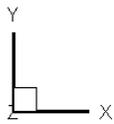
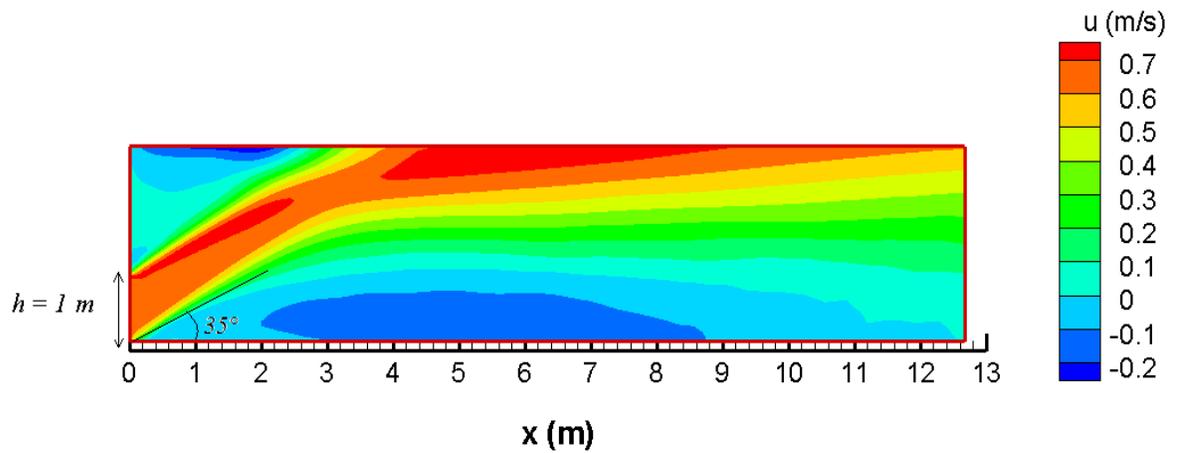


Figura 14 - Configurazione a getto inclinato, angolo 35° : mappe spaziali delle componenti di velocità orizzontale (pannello superiore) e verticale (pannello inferiore).

Si osserva infatti che all'aumentare dell'angolo, il vortice nella regione bassa del dominio si allarga, mentre quello al di sopra dello scarico si restringe.

Per quanto riguarda invece le mappe spaziali del campo di velocità, riportate in figura 14, come può essere intuito dal restringimento della sezione del getto lungo la direzione longitudinale, con questa nuova circolazione si registrano intensità più elevate, in particolare in corrispondenza della superficie libera, dove si hanno massimi valori positivi intorno ai 0.75 m/s. Inoltre, con l'allungamento del vortice sul fondo, la regione di massima intensità delle velocità negative è più estesa, dunque il fenomeno di erosione si può prevedere essere più intenso. La componente verticale assume i massimi valori positivi in corrispondenza della parete di scarico, e decresce in intensità allontanandosi da tale parete, fino a cambiare di segno a partire dalla metà del dominio, indicando la presenza della struttura circolatoria. La massima intensità negativa, circa 0,15 m/s, si registra nella zona di ricircolazione al di sopra del getto.

Per individuare l'inclinazione più favorevole tra le due confrontate è necessario osservare i risultati dell'analisi dei fenomeni di erosione del fondale. In figura 15 si riportano i grafici del rapporto τ/τ_c e della velocità di scavo in funzione della coordinata x relativi all'angolo di inclinazione pari a 25°.

Si può notare come il rapporto superi l'unità in una regione ristretta del dominio, tra i 4 e i 6 metri di distanza dalla costa, raggiungendo un massimo pari a circa 1.3. In questa stessa regione il calcolo fornisce una velocità di scavo massima inferiore a 1 millimetro/ora.

Nella successiva figura 16 sono rappresentati gli stessi diagrammi relativi all'angolo di inclinazione di 35°. In questo caso, il tratto interessato da erosione risulta più esteso, tra i 3.5 e gli 8 m a partire dalla sezione di efflusso ed il fenomeno è di entità lievemente maggiore. In particolare $\tau(x)/\tau_c$ raggiunge un massimo di circa 1.7 e la velocità di scavo stimata dal calcolo è di circa 2 millimetri/ora.

Dal confronto tra le due configurazioni a getto inclinato siamo portati a concludere che l'inclinazione di 25° sia quella più favorevole tra quelle analizzate fino a questo punto. Sono state considerate quindi ulteriori configurazioni, ottenute riducendo progressivamente l'angolo di inclinazione.

In particolare sono stati considerati due angoli, pari rispettivamente a 20° e 15°. Per un getto con un angolo di inclinazione pari a 20° le componenti della velocità di efflusso sono le seguenti:

$$u_e = 0,67 \text{ m/s lungo l'asse } x$$

$$v_e = 0,24 \text{ m/s lungo l'asse } y$$

Le variazioni riscontrabili nel diagramma delle linee di corrente (figura 17) riguardano principalmente le dimensioni dei vortici e la sezione del getto: diminuendo l'inclinazione il ricircolo

antiorario al di sopra dello scarico si estende longitudinalmente, mentre il vortice sul fondale tende a schiacciarsi ed accorciarsi.

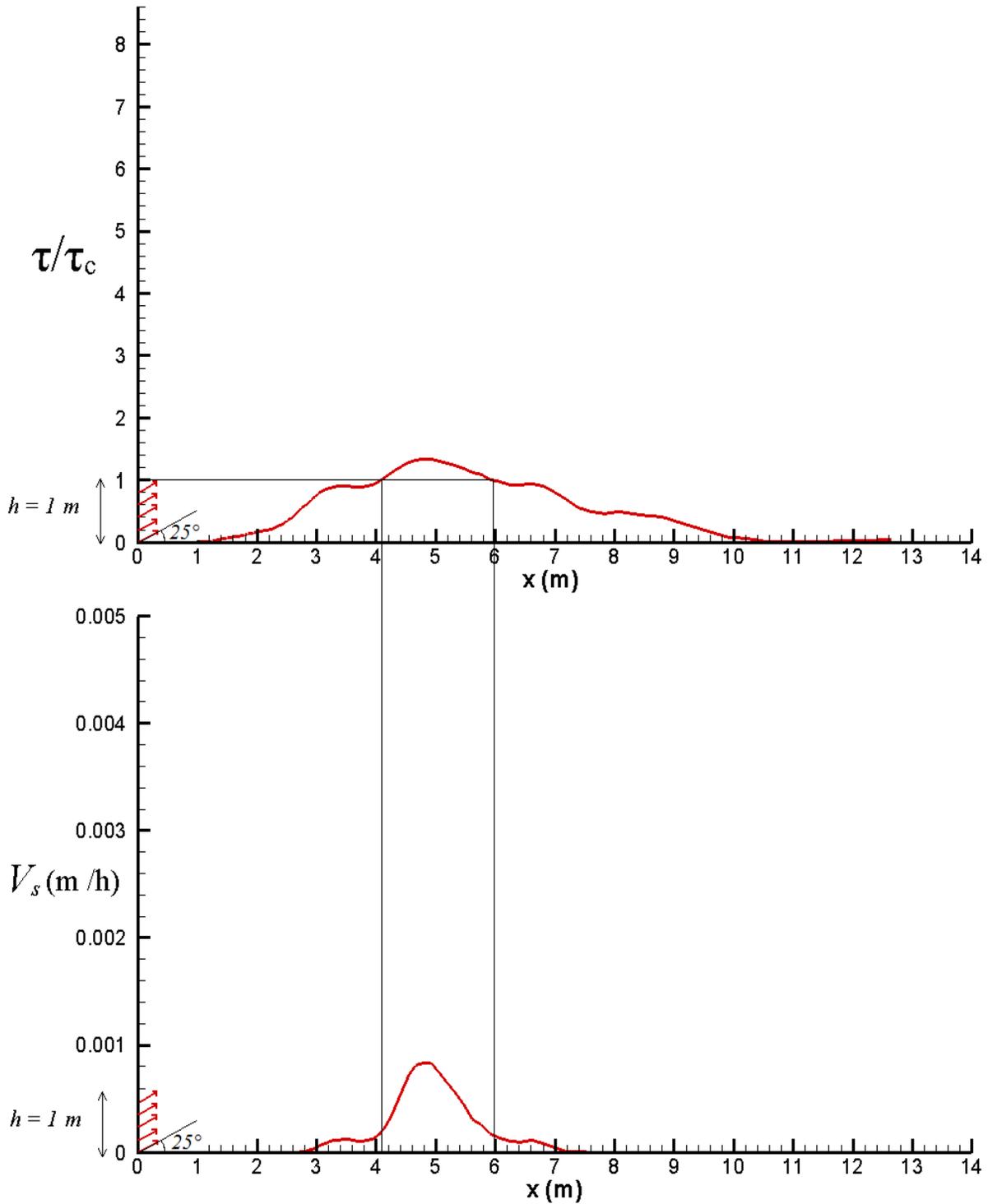


Figura 15 - Configurazione geometrica con getto inclinato, angolo 25° : andamento longitudinale del rapporto $\tau(x)/\tau_c$ (pannello superiore); distribuzione longitudinale della portata volumetrica di sedimento potenzialmente rimovibile, per unità di superficie (pannello inferiore).

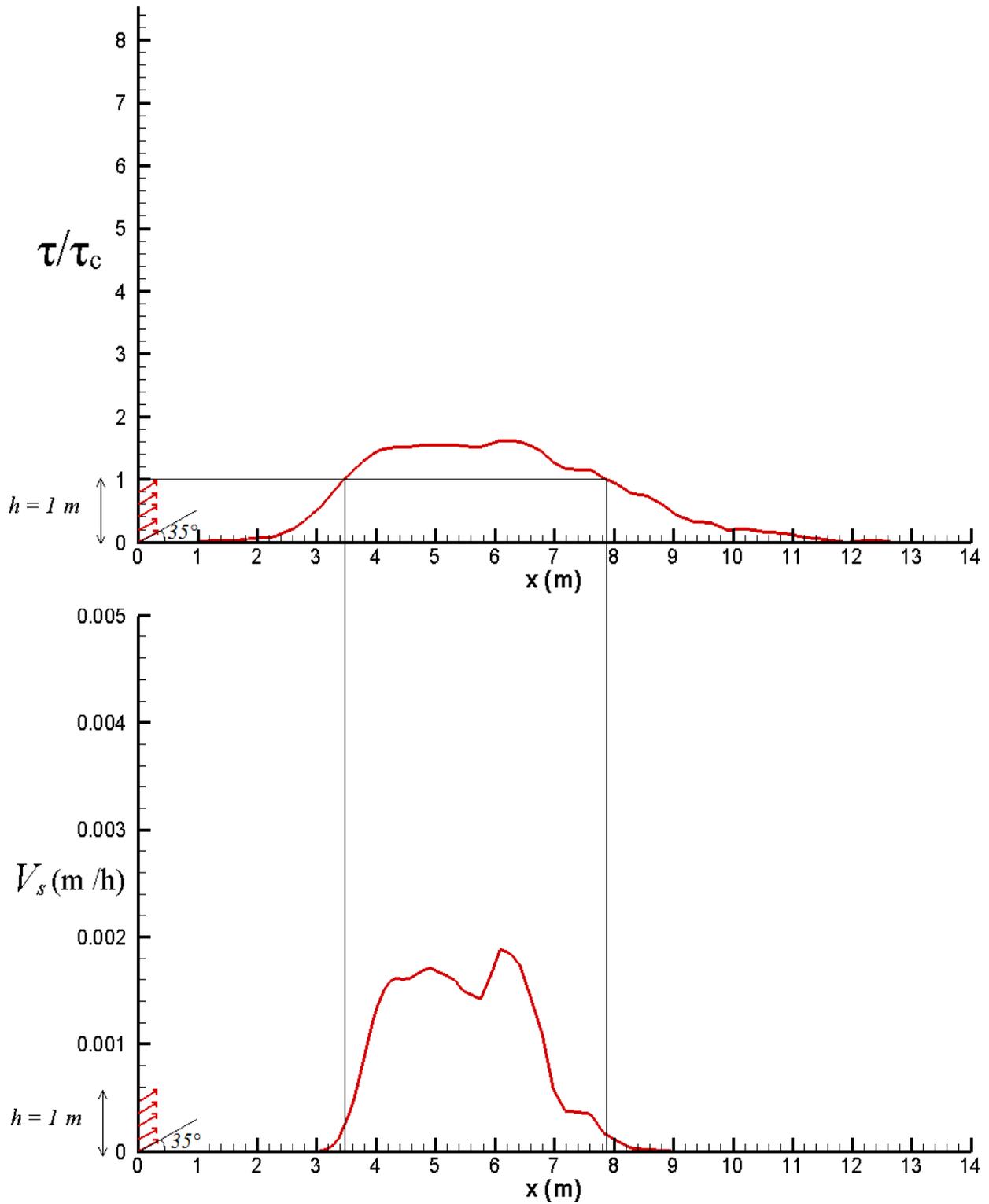


Figura 16 - Configurazione geometrica con getto inclinato, angolo 35° : andamento longitudinale del rapporto $\tau(x)/\tau_c$ (pannello superiore); distribuzione longitudinale della portata volumetrica di sedimento potenzialmente rimovibile, per unità di superficie (pannello inferiore).

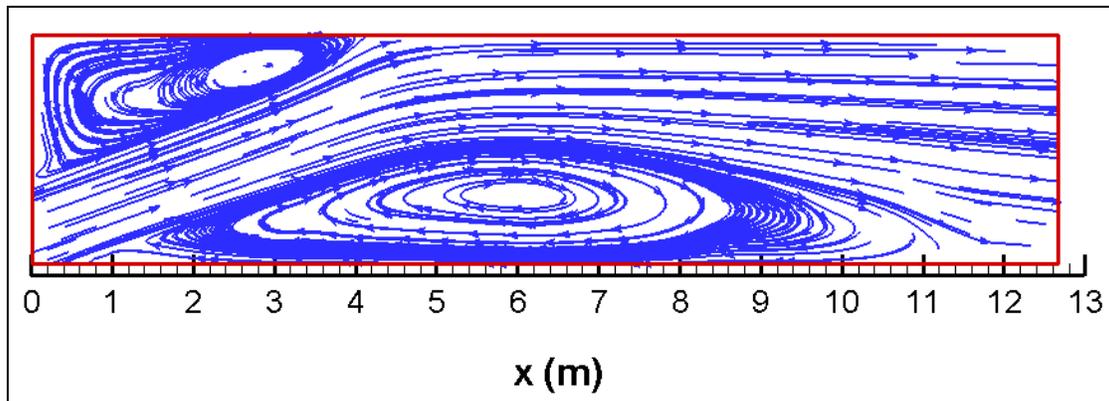


Figura 17 - Configurazione geometrica con getto inclinato, angolo 20°: mappa spaziale delle linee di corrente del moto medio.

A questa configurazione corrisponde un campo di velocità molto simile al caso 25° (si veda figura 18).

Le differenze rilevabili consistono nella riduzione della componente orizzontale del getto in prossimità della superficie, che qui resta inferiore a 0.6 m/s, e in una generale diminuzione di intensità dei valori negativi di velocità nella regione al di sotto del getto. La componente verticale, presenta valori positivi leggermente inferiori a quelli dei casi precedenti, ma un andamento generale analogo.

L'inclinazione di 15° prevede le seguenti componenti della velocità di efflusso:

$$u_e = 0,67 \text{ m/s lungo l'asse } x$$

$$v_e = 0,18 \text{ m/s lungo l'asse } y$$

Il grafico in figura 19 mostra come la progressiva riduzione dell'angolo di inclinazione porti ad una vanificazione dell'inclinazione iniziale: in questa configurazione infatti la componente verticale risulta troppo piccola per mantenere il getto separato dal fondale, quindi il flusso entrante risulta essere il diretto responsabile dello sforzo tangenziale al fondo. Come già visto nei casi precedenti, la riduzione dell'angolo porta ad un'ulteriore allargamento del ricircolo antiorario soprastante lo scarico, che in questo caso si estende fino agli 8 metri dalla parete di scarico. L'ampia ricircolazione presente al di sotto del getto nei casi precedenti, in questo caso risulta fortemente inibita e assume dimensioni molto ridotte. La riduzione dell'angolo di inclinazione oltre un certo valore produce di conseguenza un comportamento simile a quello osservato nel caso di getto orizzontale. Le notevoli differenze nella circolazione con la geometria attuale rispetto ai casi precedenti sono confermate dalle mappe dei campi di velocità, rappresentati in figura 20.

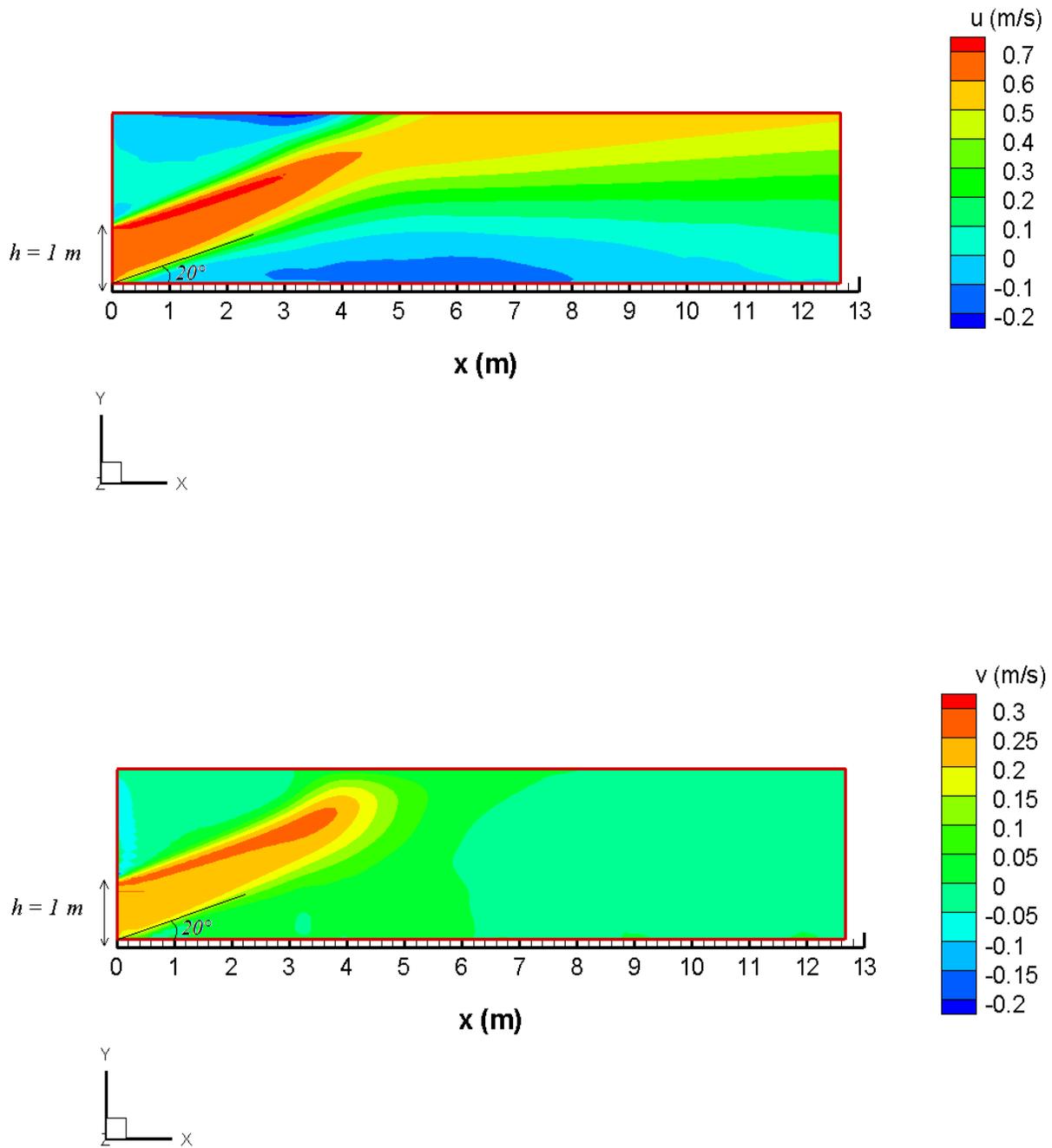


Figura 18 - Configurazione a getto inclinato, angolo 20° : mappe spaziali delle componenti di velocità orizzontale (pannello superiore) e verticale (pannello inferiore).

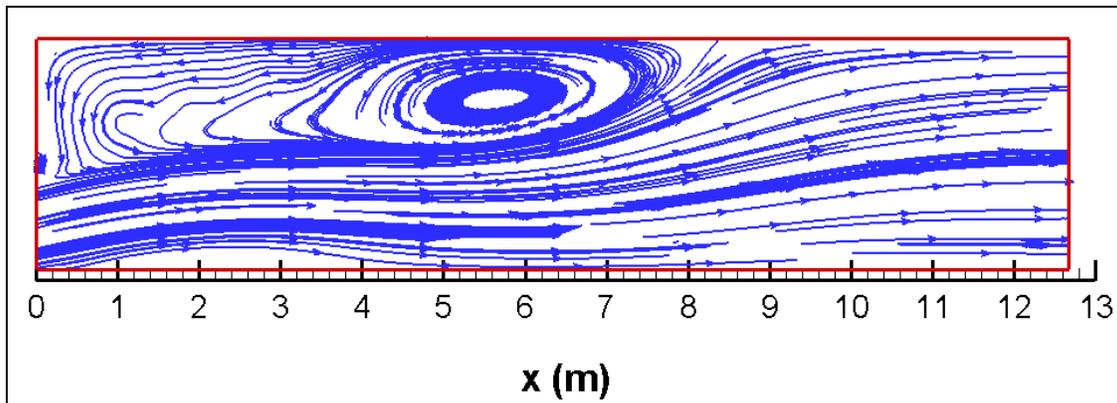


Figura 19 - Configurazione geometrica con getto inclinato, angolo 15°: mappa spaziale delle linee di corrente del moto medio.

Osservando la mappa spaziale della componente orizzontale di velocità, si nota come nella parte bassa del dominio scorra il getto, con velocità positive sull'intera lunghezza, con intensità decrescenti allontanandosi dalla parete di scarico, mentre nella regione superiore la componente u è negativa, per effetto del vortice evidenziato in figura 19. Il valore massimo di velocità negativa è raggiunto in prossimità della superficie all'incirca al centro della regione studiata.

La componente verticale presenta sulla quasi totalità del dominio intensità molto basse e positive, eccetto che nella zona a ridosso della parete sopra lo scarico, dove la velocità è diretta verso il fondo. L'intensità massima è inferiore a 0.1 m/s, fatta eccezione per il valore di ingresso, pari a 0.18 m/s.

L'analisi delle caratteristiche erosive delle due inclinazioni a confronto porta, in questo caso, a due risultati nettamente differenti. Come si può infatti notare dalla figura 21, il getto con un'angolazione di 20° porta a valori del rapporto $\tau(x)/\tau_c$ inferiori all'unità su gran parte del dominio analizzato, ad eccezione della zona compresa tra i 5,5 e i 7,5 metri dallo scarico, in cui il rapporto non supera il valore 1.2.

La corrispondente curva delle velocità di scavo mostra nella regione compresa tra i 5.5 e i 7.5 metri dallo scarico un valore massimo di circa mezzo millimetro/ora.

La configurazione a getto inclinato di 15°, come già suggerivano le mappe delle componenti di velocità, mostra invece un'amplificazione dei fenomeni erosivi: $\tau(x)/\tau_c$ è maggiore di 1 in una zona che si estende tra i 5 e gli 8 metri dallo scarico, con un valore massimo pari a circa 2, con una velocità di scavo pari a circa 6 millimetri/ora, valore nettamente superiore ai massimi riscontrati negli altri casi a getto inclinato.

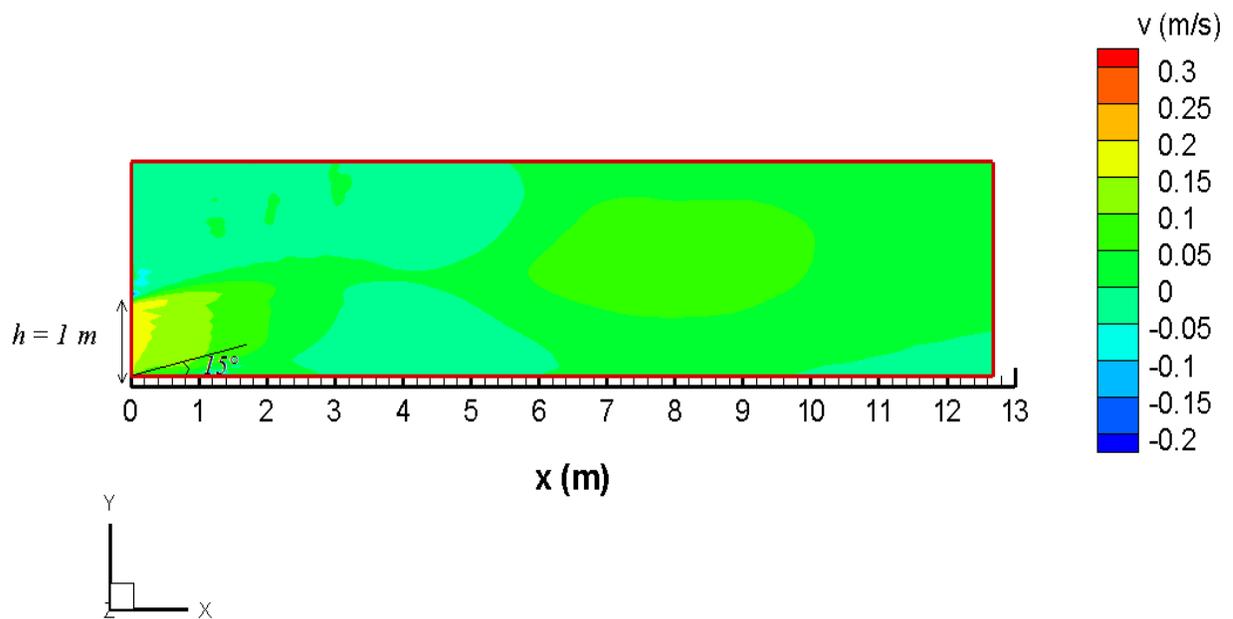
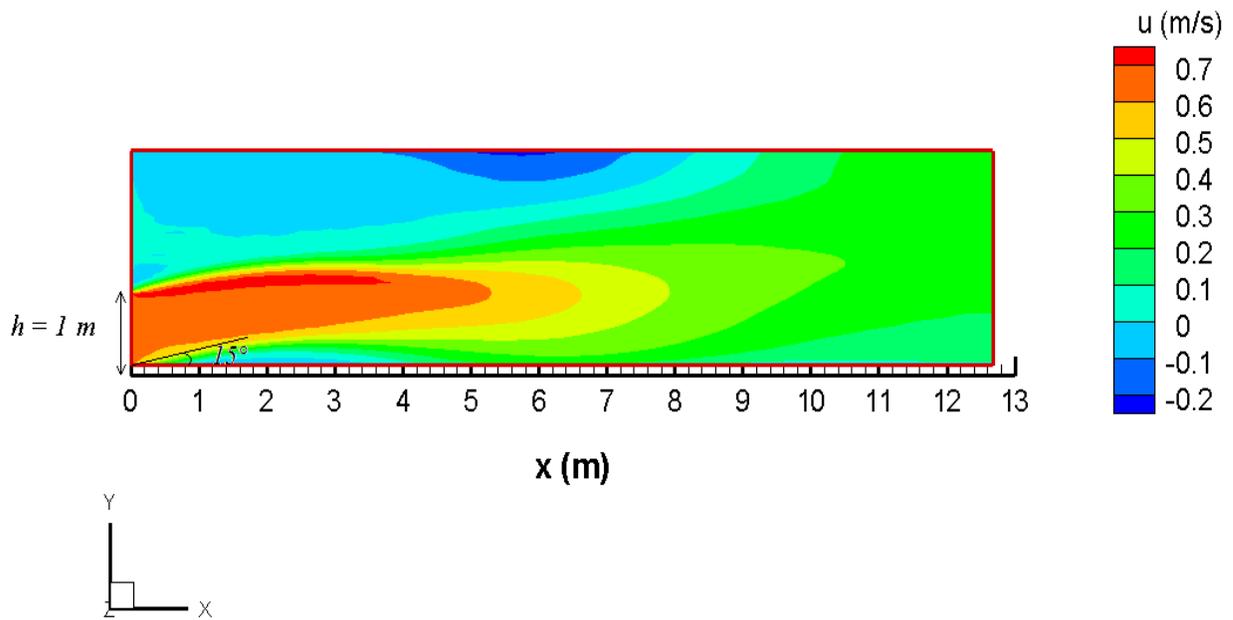


Figura 20 - Configurazione a getto inclinato, angolo 15° : mappe spaziali delle componenti di velocità orizzontale (pannello superiore) e verticale (pannello inferiore).

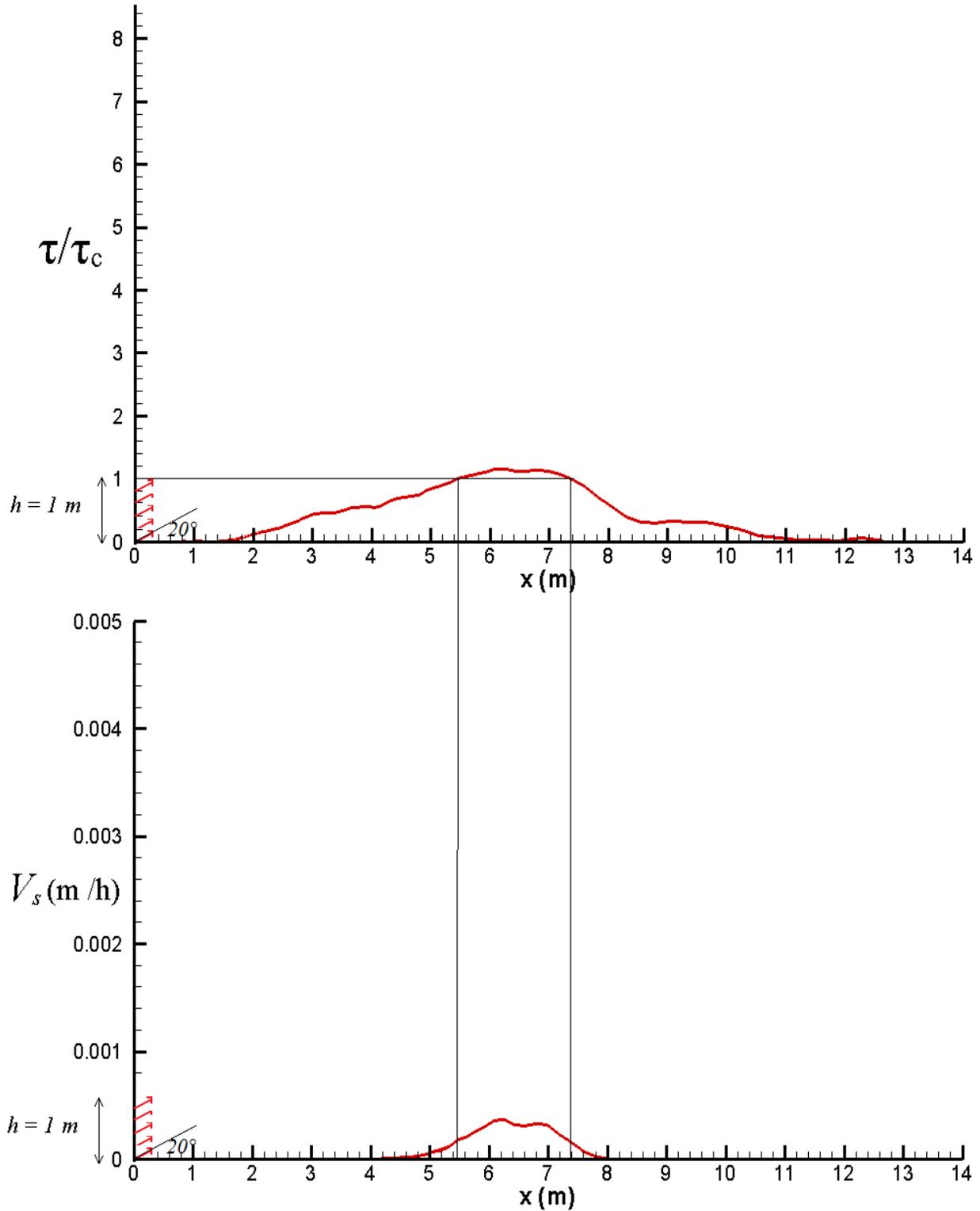


Figura 21 - Configurazione geometrica con getto inclinato, angolo 20° : andamento longitudinale del rapporto $\tau(x)/\tau_c$ (pannello superiore); distribuzione longitudinale della portata volumetrica di sedimento potenzialmente rimovibile, per unità di superficie (pannello inferiore).

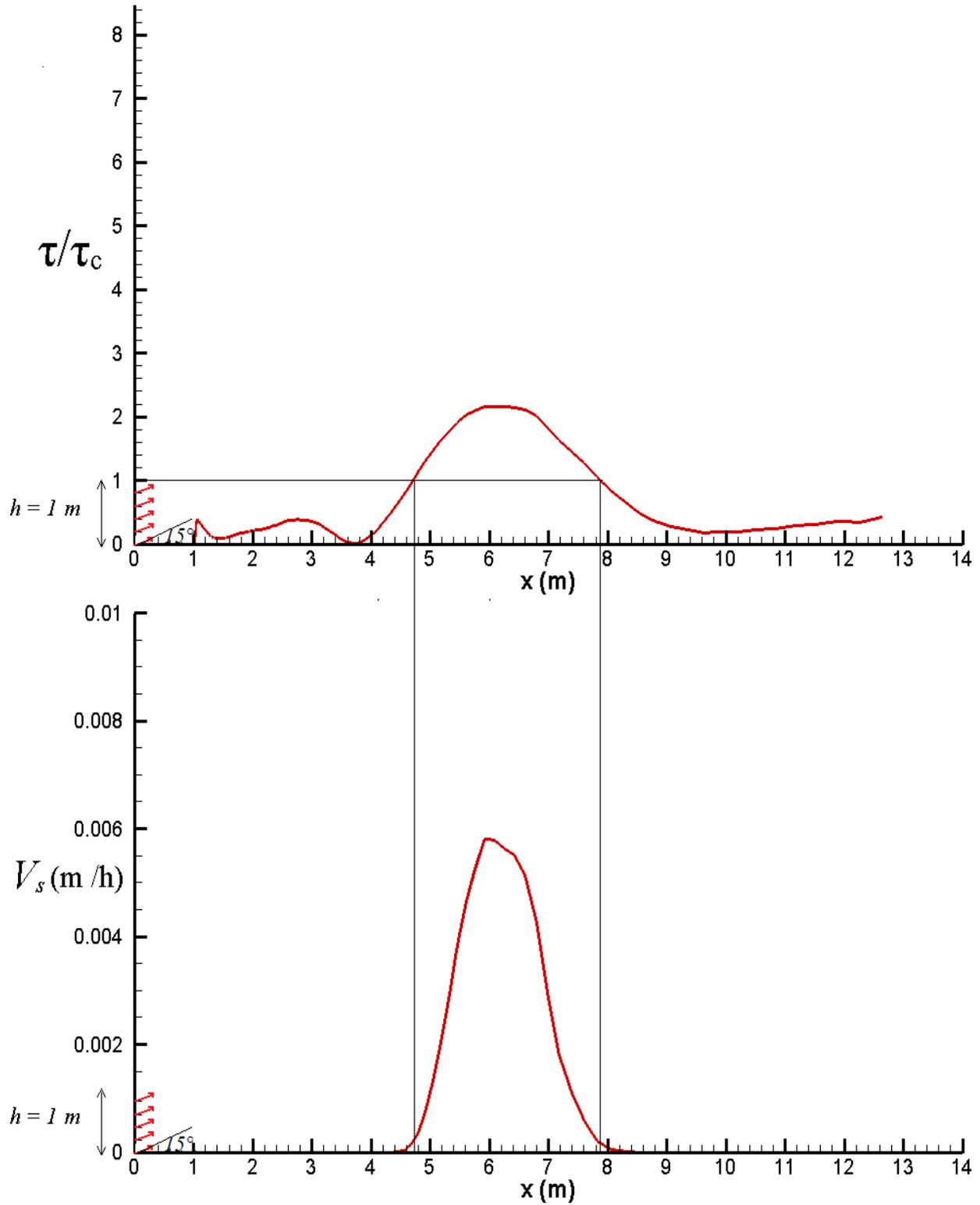


Figura 22 - Configurazione geometrica con getto inclinato, angolo 15° : andamento longitudinale del rapporto $\tau(x)/\tau_c$ (pannello superiore); distribuzione longitudinale della portata volumetrica di sedimento potenzialmente rimovibile, per unità di superficie (pannello inferiore).

Alla luce dei risultati ottenuti, è possibile concludere che la configurazione ottimale a getto inclinato è quella con un angolo di 20° rispetto all'orizzontale, in quanto con essa si riducono al minimo gli effetti erosivi.

Nel tentativo di eliminare completamente tali effetti, come ultima fase della ricerca della configurazione ottimale si è proceduto aumentando l'altezza della luce di scarico da 1 metro a 1.25 m: in tal modo la componente longitudinale della velocità del getto si riduce, per mantenere la portata costante, e con essa l'entità dello sforzo tangenziale al fondo.

Si riportano di seguito i risultati ottenuti in questo ultimo caso.

Le componenti della velocità di efflusso per un'inclinazione di 20° e una luce di scarico alta 1,25 m sono le seguenti:

$$u_e = 0,54 \text{ m/s lungo l'asse } x$$

$$v_e = 0,20 \text{ m/s lungo l'asse } y$$

In figura 23 sono riportate le linee di corrente, molto simili a quelle mostrate in figura 17 per lo stesso angolo di inclinazione e altezza della luce di efflusso pari a 1 m. Come per tutte le configurazioni a getto inclinato, il flusso entrante tende ad allargarsi naturalmente, occupando la maggior parte della colonna d'acqua. Grazie all'inclinazione iniziale, il getto è sollevato dal fondale almeno nella parte più vicina allo scarico dove le velocità sono maggiori. Solo a partire dai 10 metri di distanza dallo scarico il getto entra in contatto con il fondo, ma, data la sezione molto larga, esercita uno sforzo notevolmente ridotto.

In questa configurazione, le zone occupate dai ricircoli sono piuttosto limitate: in entrambi i casi i vortici si sviluppano più in direzione longitudinale che in altezza.

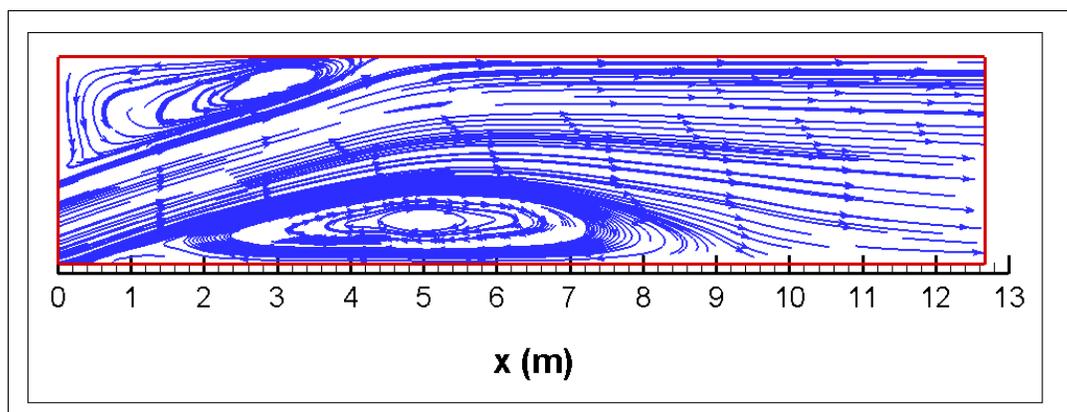


Figura 23 - Configurazione geometrica con getto inclinato, angolo 20° , altezza della luce di scarico 1.25 m: mappa spaziale delle linee di corrente del moto medio.

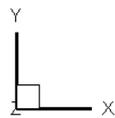
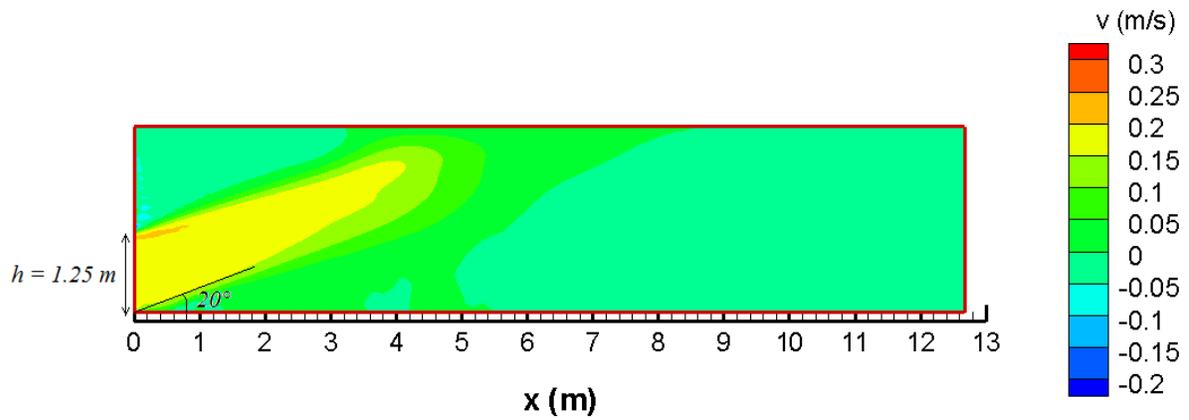
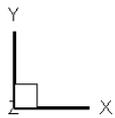
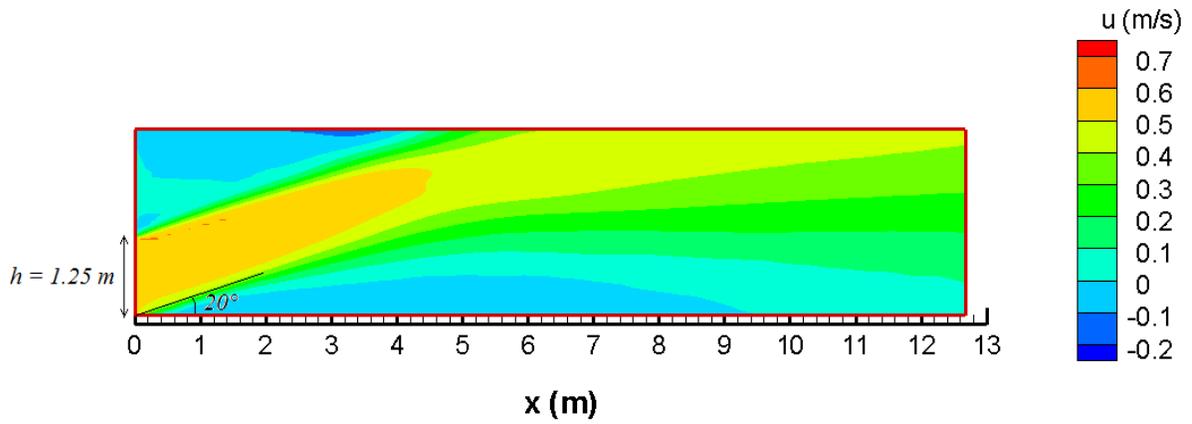


Figura 24 - Configurazione a getto inclinato, angolo 20° , altezza scarico 1,25 m: mappe spaziali delle componenti di velocità orizzontale (pannello superiore) e verticale (pannello inferiore).

Dall'osservazione delle mappe spaziali delle componenti di velocità riportate in figura 24, risulta evidente una generale riduzione di intensità rispetto al caso con pari angolo di inclinazione e altezza di scarico pari a 1 m (si confronti con figura 18). Il massimo valore positivo della componente longitudinale, raggiunto nella parte iniziale del getto, è intorno a 0.6 m/s mentre l'intensità delle velocità agenti sul fondo è inferiore a 0.1 m/s, quindi decisamente ridotta rispetto ai precedenti casi. Il massimo valore della componente u in direzione negativa viene registrato in corrispondenza della superficie, per effetto del ricircolo antiorario.

La componente verticale si riduce a sua volta, restando su gran parte del dominio inferiore a 0.1 m/s, in entrambe le direzioni. Il massimo positivo si ha nella parte alta del getto, mentre quello negativo a ridosso della parete al di sopra dello scarico.

La notevole riduzione degli sforzi conseguente alla diminuzione dell'intensità del campo di velocità porta alla auspicata eliminazione degli effetti erosivi: come si può infatti osservare dal grafico in figura 25, in questa configurazione il rapporto $\tau(x)/\tau_c$ resta nettamente al di sotto dell'unità lungo l'intera estensione del dominio di calcolo, dunque non si registra alcuna significativa velocità di scavo.

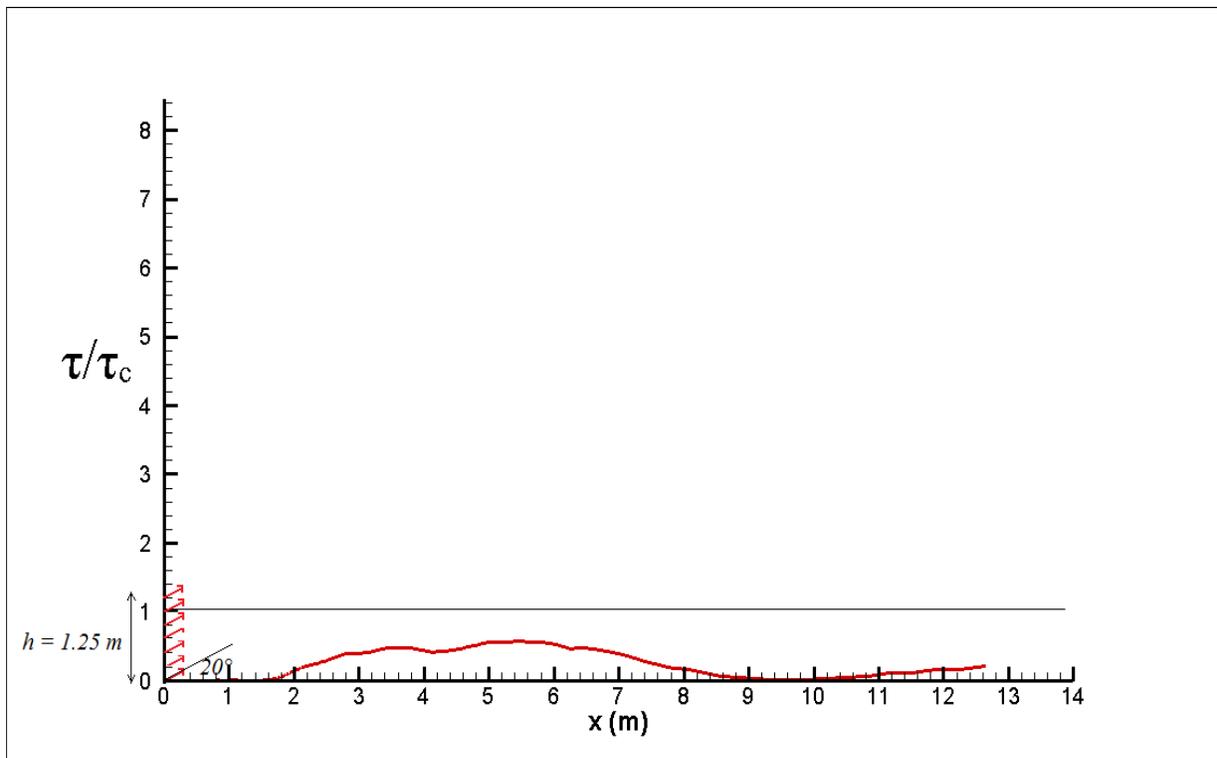


Figura 25 - Configurazione geometrica con getto inclinato, angolo 20° e altezza della luce di scarico pari a 1.25 m: andamento longitudinale del rapporto $\tau(x)/\tau_c$.

Alla luce dei risultati ottenuti, possiamo concludere che la configurazione ottimale che porta all'eliminazione degli effetti erosivi corrisponda ad un getto inclinato di 20° rispetto all'orizzontale su un'altezza di scarico totale pari a 1,25 metri.

2.4 Studio del transitorio iniziale

I risultati analizzati, come già specificato, sono frutto di una media effettuata nel tempo e lungo la direzione di omogeneità, ovvero quella trasversale. La media è stata effettuata dopo l'estinzione dei fenomeni transitori iniziali.

Per completare l'analisi della configurazione geometrica individuata come ottimale, si intende rappresentare il comportamento idrodinamico durante il transitorio iniziale, ovvero l'entità delle grandezze istantanee legate ai fenomeni erosivi nel periodo compreso tra l'istante iniziale di emissione del getto e il raggiungimento dell'equilibrio.

Le simulazioni sono state condotte in due differenti casi: un primo caso in cui, già dal primo istante, lo scarico ha una portata pari a quella totale; un secondo caso in cui la portata iniziale è pari a metà di quella totale, e solo una volta raggiunta la stabilità, viene immessa la rimanente portata.

2.4.1 Immissione di portata di regime

Sono riportati di seguito i grafici del valore istantaneo del rapporto $\tau(x)/\tau_c$ trascorsi i primi 8 secondi e a intervalli regolari di circa 15 secondi. Si può notare come durante la fase di assestamento, si registrino valori estremamente superiori all'unità (fino a 22) e come il valore di picco si sposti nel tempo in direzione longitudinale, allontanandosi dallo scarico. Come risulta evidente anche dal filmato dell'evoluzione temporale di questa grandezza (film_sforzo_portataregime.avi), dopo circa 2 minuti dall'immissione della portata liquida, il valore si assesta intorno a 1. Infine dopo circa 3 minuti a partire dall'inizio di funzionamento dell'impianto, si raggiunge il valore di regime riportato nella figura 25. Tale comportamento è dovuto al fatto che all'avviamento si sviluppa un vortice molto intenso che ruota in senso orario. Tale vortice produce una componente di velocità orizzontale molto intensa con segno opposto rispetto a quella di efflusso in corrispondenza del fondo. Durante lo sviluppo del campo di moto, tale vortice si espande e si allontana dallo scarico fino ad esaurirsi completamente, portando ad una configurazione di equilibrio di figura 23. La generazione di tale vortice, il suo spostamento longitudinale e la sua graduale attenuazione (evidenziati in film_campovel_portataregime.avi, animazione allegata alla presente relazione) producono gli andamenti evidenziati nella figura 26, che mostra infatti come il picco massimo di sforzo tangenziale cresce nelle primissime fasi di scarico e successivamente decresce, allontanandosi gradatamente dalla zona di emissione.

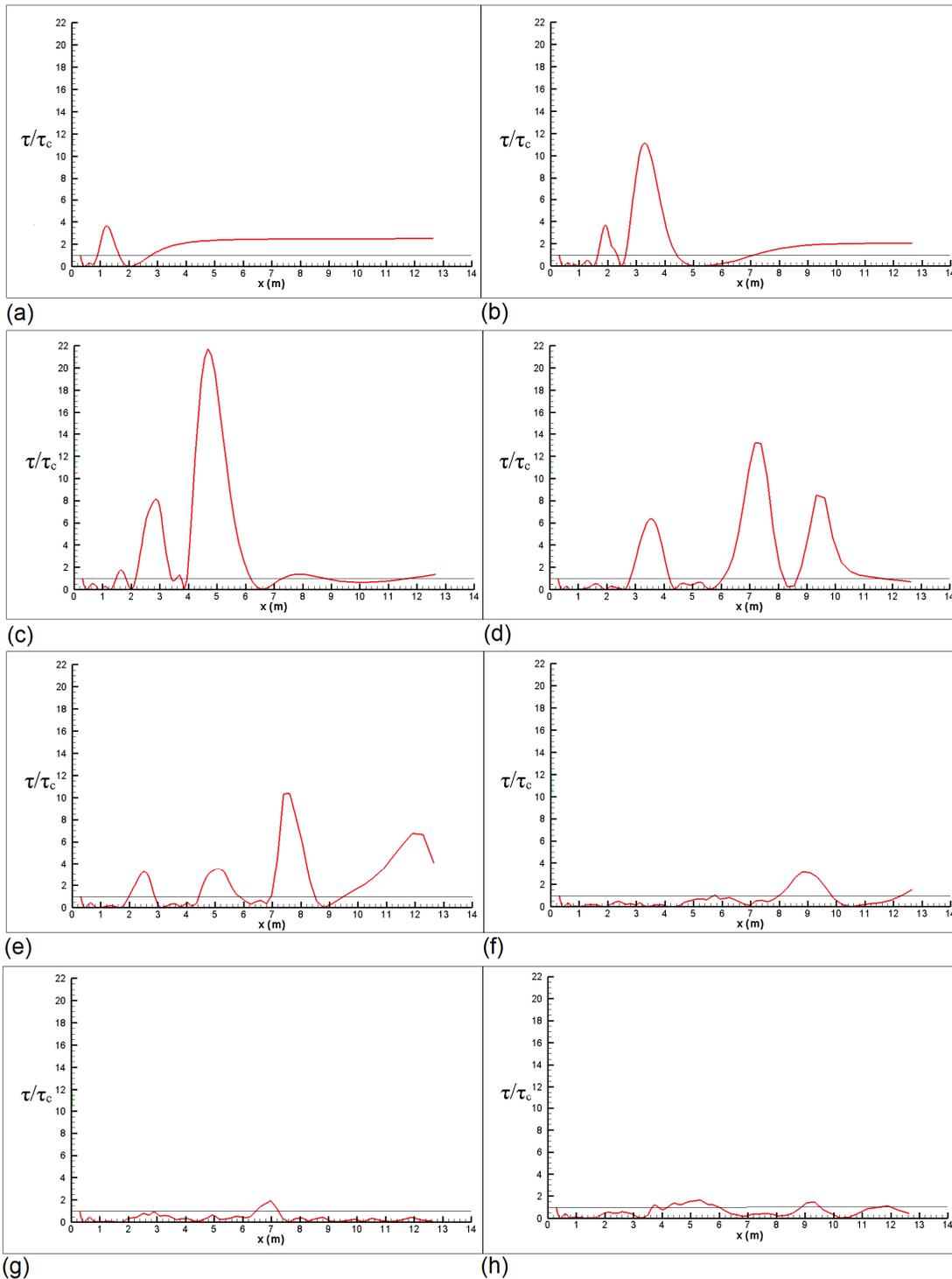


Figura 26 - Distribuzione longitudinale del rapporto $\tau(x)/\tau_c$ durante il transitorio iniziale con avviamento a portata di regime: (a) $t=8$ s; (b) $t=23$ s; (c) $t=38$ s; (d) $t=53$ s; (e) $t=68$ s; (f) $t=83$ s; (g) $t=98$ s; (h) $t=113$ s.

I risultati mostrano che nel caso di avviamento del sistema di raffreddamento con la portata di regime, nei primi minuti di funzionamento è da aspettarsi un fenomeno di erosione localizzato che tenderà a risospendere sedimenti nella zona antistante lo scarico stesso. Tale risospensione risulta limitata nel tempo e si esaurirà dopo alcune decine di minuti di funzionamento dell'impianto.

2.4.2 Immissione a portata frazionata

Si considera in questa sezione l'avviamento in due fasi successive, una prima fase con un valore di portata dimezzato rispetto a quello di regime ed una seconda fase nella quale si raggiunge il valore di regime. Questa è d'altra parte la procedura normalmente utilizzata per il funzionamento dell'impianto. E' stata quindi ripetuta la simulazione del transitorio iniziale con portata iniziale pari alla metà di quella totale prevista.

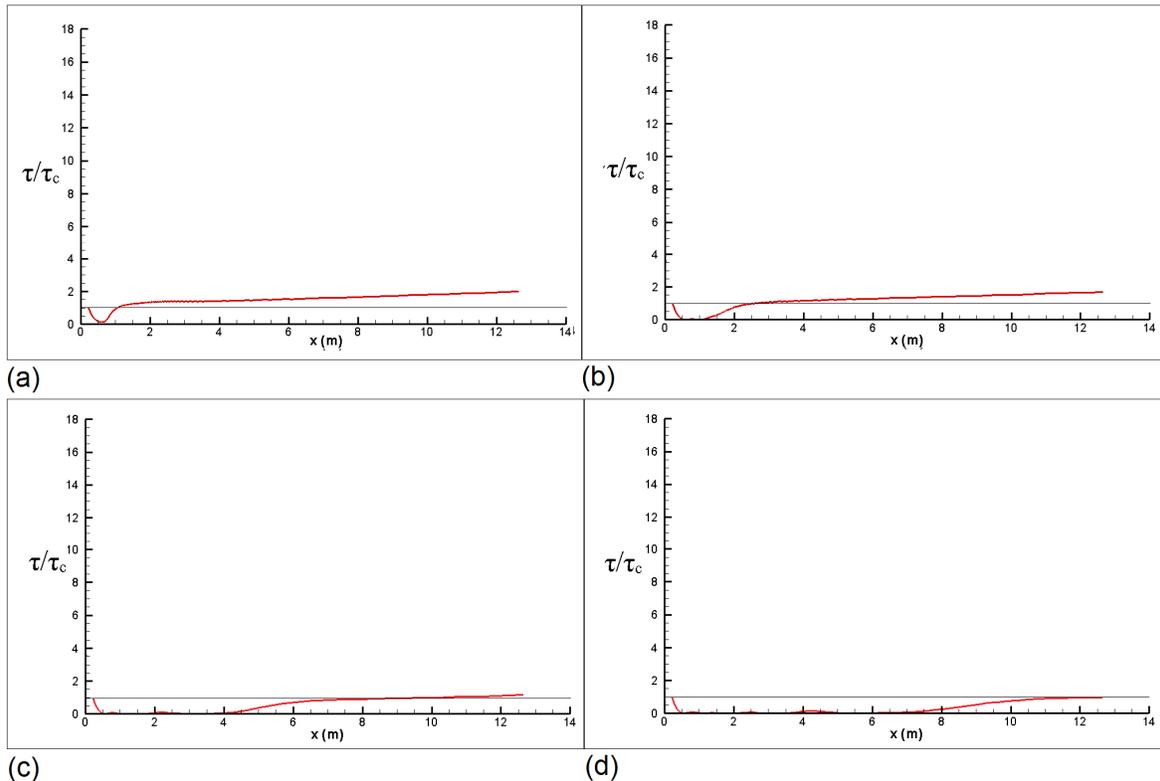


Figura 27 - Distribuzione longitudinale del rapporto $\tau(x)/\tau_c$ durante il transitorio iniziale nel caso di avviamento frazionato: a) $t=4$ s; (b) $t=8$ s; (c) $t=24$; (d) $t=40$.

Come per il caso precedente, si sviluppa un vortice ad asse orizzontale che ruota in senso orario. Tale vortice è comunque di intensità molto debole e lo sforzo tangenziale indotto sul fondo durante il transiente iniziale risulta solo leggermente superiore al valore critico. Nella figura 27 sono riportate le distribuzioni longitudinali del rapporto $\tau(x)/\tau_c$ tra lo sforzo al fondo ed il valore critico a

4 istanti di tempo differenti a partire dall'inizio del funzionamento dell'impianto. Si può notare come, essendo la portata estremamente ridotta, i valori del rapporto restino piuttosto bassi e già dopo i primi 40 secondi decisamente al di sotto dell'unità.

Una volta raggiunto l'equilibrio, la portata viene aumentata fino al valore finale di regime. L'aumento di portata produce un ulteriore fenomeno transitorio. La distribuzione longitudinale del rapporto $\tau(x)/\tau_c$ a 6 differenti istanti di tempo è riportata nella figura 28.

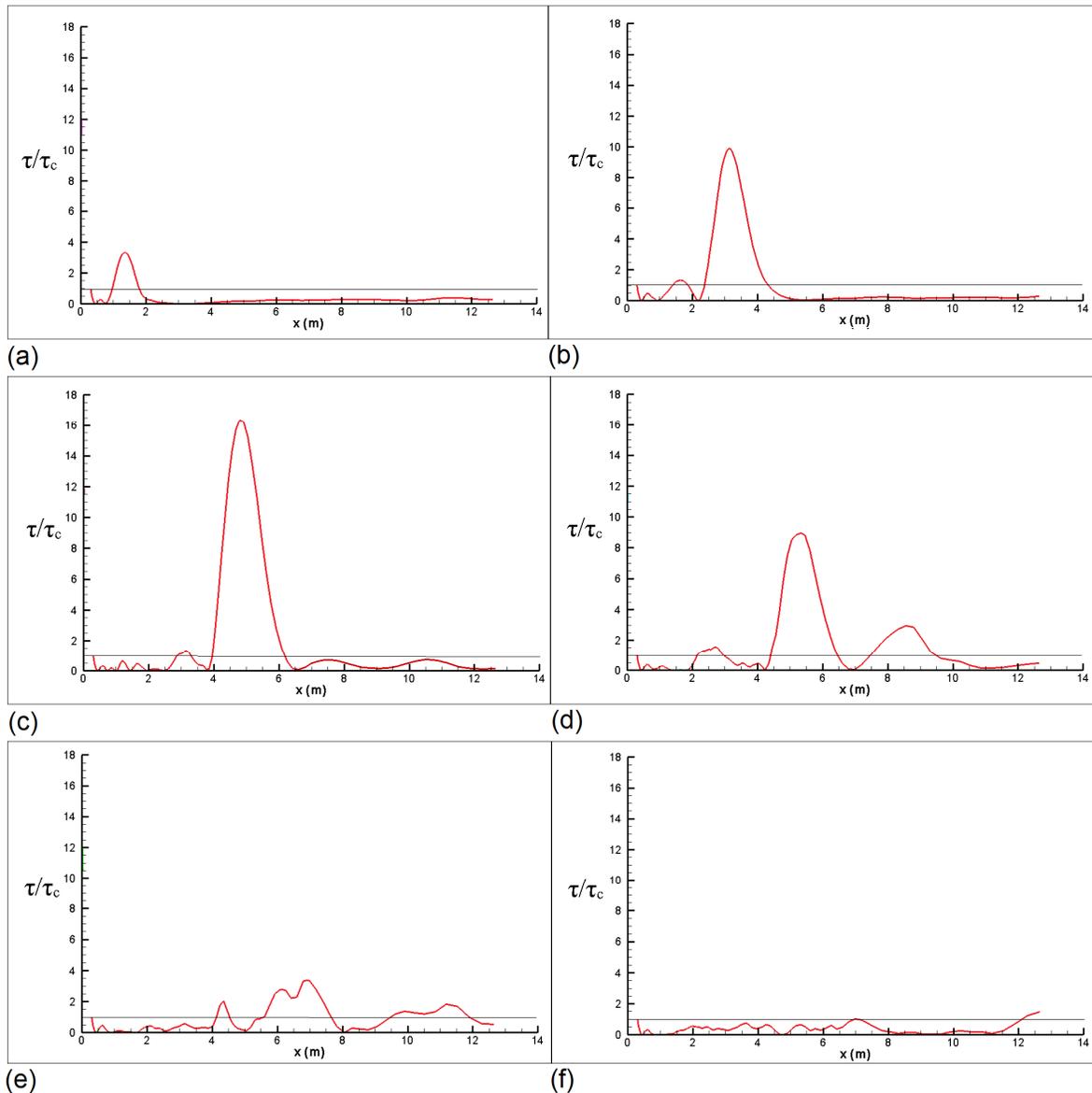


Figura 28 - Distribuzione longitudinale del rapporto $\tau(x)/\tau_c$ durante il transitorio iniziale con avviamento frazionato, durante la fase di aumento di portata fino al valore di regime: (a) $t=4$ s; (b) $t=19$ s; (c) $t=34$ s; (d) $t=49$ s; (e) $t=64$ s; (f) $t=79$ s.

L'evoluzione è abbastanza simile al caso di transitorio con portata di regime (si confronti figura 28 con figura 26), con valori di picco di $\tau(x)/\tau_c$ che tendono a smorzarsi nel tempo e ad allontanarsi dalla zona di scarico. In questo caso, però, essendo la variazione di portata meno ingente, il massimo valore raggiunto da $\tau(x)/\tau_c$ è inferiore a quello del caso precedente (16 contro il valore di 22 del primo caso). Il valore scende progressivamente, fino a stabilizzarsi sotto l'unità dopo circa 1 minuto e mezzo di funzionamento a regime. Dopo un tempo pari a circa 2 minuti dall'immissione della seconda frazione di portata liquida, si ottiene la distribuzione di equilibrio mostrata in figura 25.

In sintesi lo studio del transitorio iniziale ha mostrato che:

- 1) in entrambi i casi (avvio a regime e avvio frazionato), durante un breve intervallo di tempo quantificabile in pochi minuti, si osservano valori elevati di sforzo tangenziale sul fondo che possono dare luogo a fenomeni di erosione. Per il caso parzializzato valori elevati si osservano durante la seconda fase, ovvero nel passaggio da portata dimezzata a portata di regime;
- 2) Nel caso di avviamento parzializzato i valori di picco dello sforzo sul fondo sono inferiori a quelli del caso di avviamento con portata di regime;
- 3) In entrambi i casi, l'avviamento produrrà un fenomeno erosivo limitato nel tempo e nello spazio. Tale fenomeno probabilmente darà luogo ad una colorazione dell'acqua marina dovuta alla presenza di materiale risospeso. Tale colorazione tenderà a scomparire rapidamente durante il funzionamento dell'impianto.
- 4) Tra i due tipi di avviamento, quello parzializzato sembra in grado di produrre fenomeni erosivi meno intensi rispetto all'avviamento con portata di regime.

3. SECONDA PARTE: VERIFICA DEL RISPETTO DELLA NORMATIVA

La fase finale del presente studio è finalizzata a verificare l'effettivo rispetto della normativa vigente sugli scarichi a mare nella nuova configurazione valutata come la geometria ottimale. Si mette in evidenza che la nuova configurazione prevede uno scarico inclinato di 20° sull'orizzontale con una luce di scarico di altezza pari a 1.25 m.

Per questo ulteriore test è necessario inserire lo scarico in un dominio più ampio, comprendente una larga regione all'interno della baia di Muggia, come fatto in Studio-Elettra [2].

La griglia più opportuna a tale scopo, già utilizzata in Studio-Elettra [2], ha la forma di un settore circolare, con un'apertura sull'orizzontale di 25° e un'estensione longitudinale di 2000 m parallela allo scarico in direzione est-ovest (figura 29).

Il sistema di riferimento adottato è una terna ortogonale non destrorsa con l'asse x diretto da ovest a est, asse z diretto da sud a nord e asse y orientato dal fondo verso la superficie. L'origine del riferimento è posto nell'angolo sud-ovest del dominio, in corrispondenza del fondale.

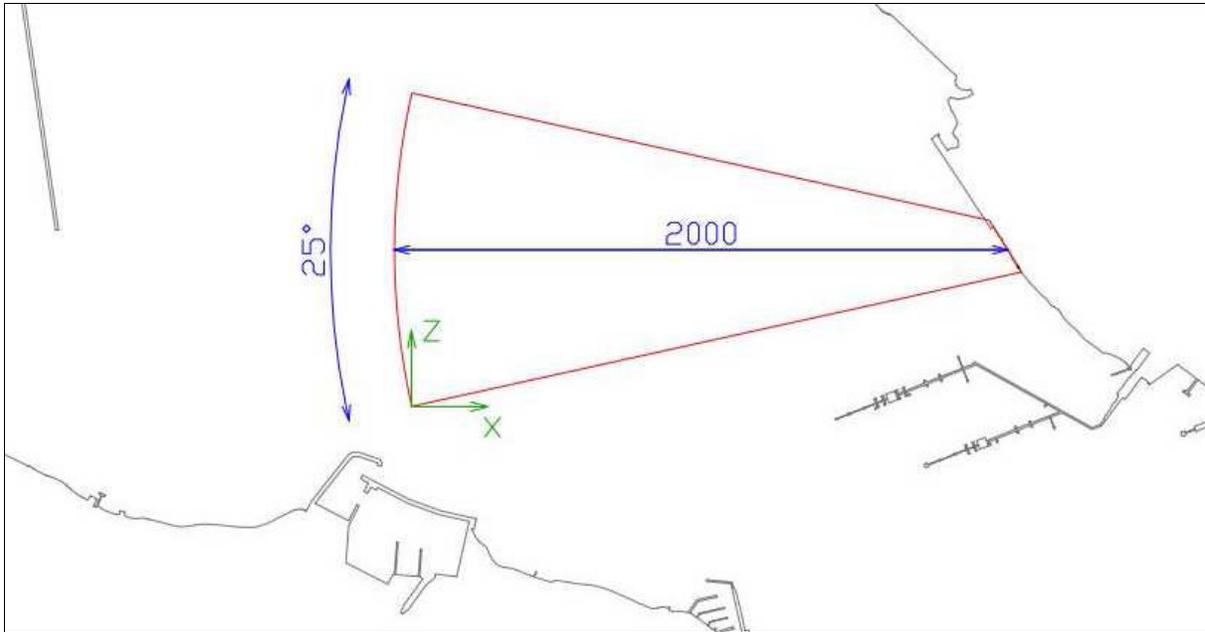


Figura 29 - Collocazione del dominio di calcolo all'interno della baia di Muggia.

La parete orientale del dominio di calcolo coincide con il tratto di costa su cui sorge l'impianto, copre una lunghezza complessiva di 200 m e su di essa sono collocate le opere di restituzione e di presa, rispettivamente a 80 metri e 180 metri dall'angolo nord-est del dominio.

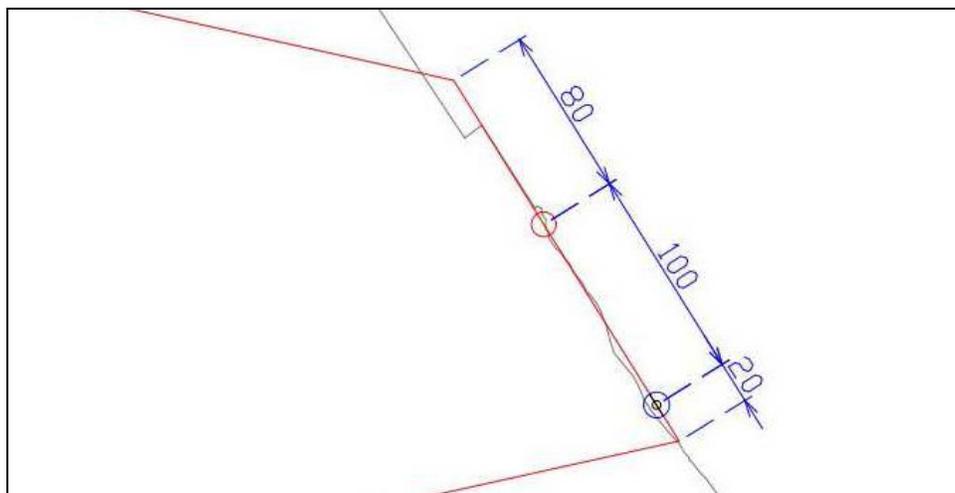


Figura 30 - Particolare del profilo costiero con le sezioni di presa e restituzione in evidenza.

La figura 30 contiene un particolare di tale tratto di costa, con l'opera di presa e di restituzione evidenziate rispettivamente dai cerchi blu e rosso. Il contributo della presa è stato incluso nella simulazione per compensare realisticamente il flusso in entrata dovuto alla restituzione.

Il dominio computazionale adottato nel precedente studio è stato modificato con l'aggiunta di una cosiddetta regione di "buffer" lungo le pareti aperte: questa nuova zona ha lo scopo di impedire che le condizioni imposte sul contorno vadano ad influenzare il moto sviluppatosi nel dominio interno, di reale interesse. La figura seguente mostra i contorni della griglia computazionale, distinguendo il dominio interno (in rosso) dall'area di buffer (in verde).

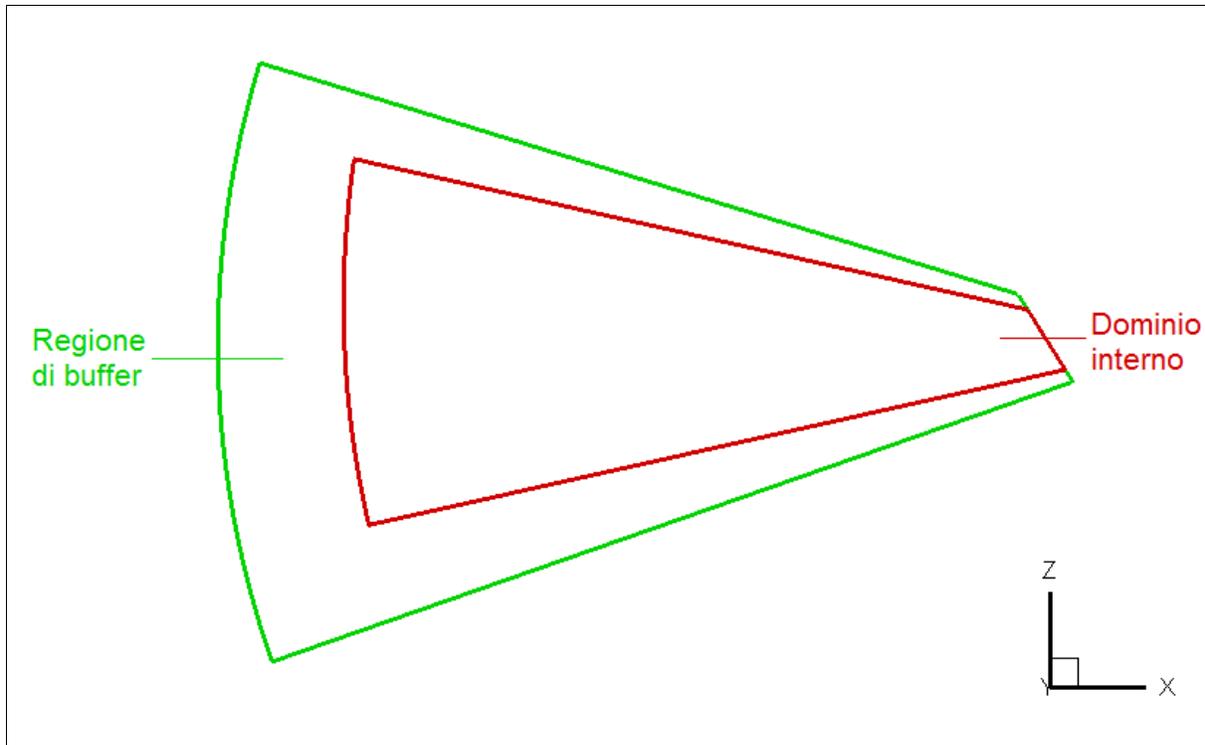


Figura 31 - Vista del piano xz superficiale del dominio di calcolo. Si evidenzia la regione occupata dal dominio interno, di reale interesse, dalla regione di buffer utilizzata per l'imposizione delle condizioni al contorno. Il dominio contornato dalle linee rosse è uguale a quello considerato in Studio-Elettra [2].

E' importante osservare che il dominio del problema in esame presenta una forte anisotropia tra le dimensioni orizzontali e quella verticale: l'estensione orizzontale è infatti dell'ordine del kilometro, mentre quella verticale è dell'ordine delle decine di metri. Le immagini della griglia computazionale riportate nel seguito pertanto presentano un'amplificazione nella direzione y per facilitare la visualizzazione.

Il fondo della griglia è stato costruito facendo riferimento alla batimetria dell'area d'interesse. I dati estratti dalla carta tecnica riguardanti le quote batimetriche hanno permesso di ottenere un insieme di punti significativo al fine di descrivere l'andamento del fondale antistante l'impianto. I punti della griglia di calcolo rappresentativi del fondale sono stati interpolati a partire dai dati batimetrici disponibili. La figura 32 rappresenta il fondo della griglia così ottenuto. Nell'immagine si possono

distinguere le regioni di contorno costituenti il buffer: in tali regioni non è richiesta una descrizione realistica del flusso, quindi, per semplicità, la profondità è stata mantenuta costante.

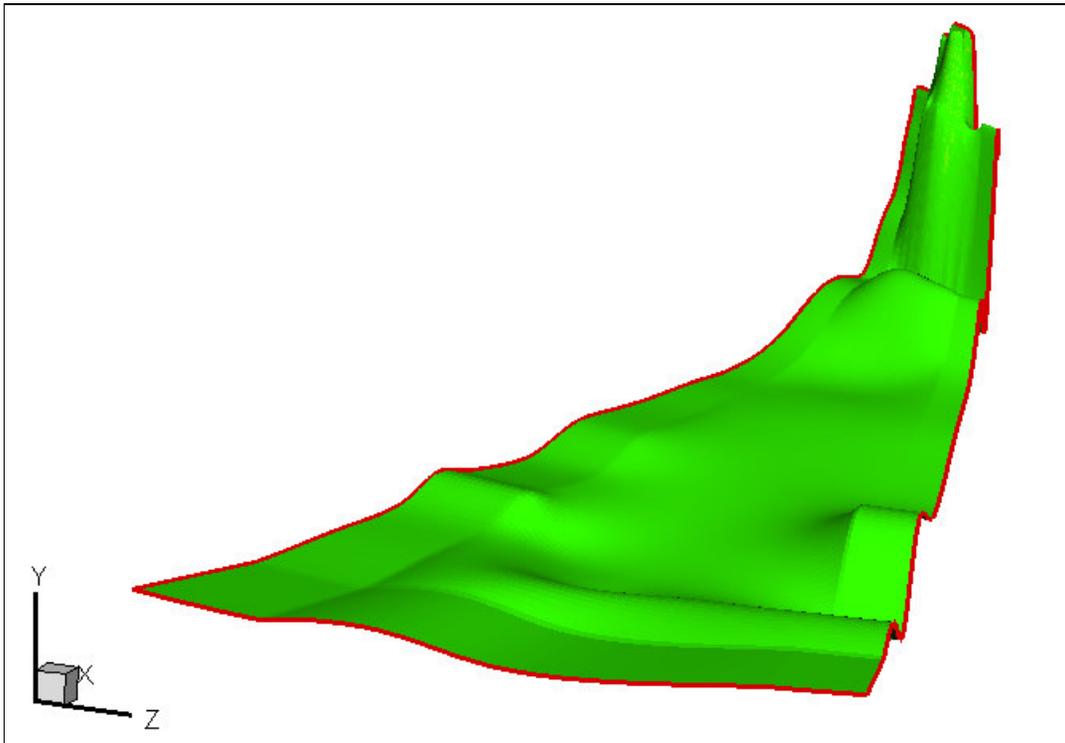


Figura 32 - Andamento del fondo della griglia computazionale. La geometria è stata ottenuta da interpolazione di dati batimetrici delle zona in esame. La scala lungo y è stata amplificata per ragioni di visualizzazione.

Le dimensioni della griglia sono di 272 celle in direzione x, di cui 16 appartenenti al buffer, 24 celle in y e 160 celle in z, di cui 32 di buffer. L'anisotropia del dominio si riflette anche nelle dimensioni delle singole celle, che risultano quindi essere molto sottili (sheet-like shaped), più ampie nelle direzioni orizzontali che in quella verticale.

La griglia è stata costruita in modo da avere una maggiore risoluzione nelle zone caratterizzate da alti valori dei gradienti di velocità e di pendenza del fondale, dunque risulta infittita nel settore centrale, lungo l'asse del punto di emissione, e in prossimità della costa. Tali zone sono individuabili nella rappresentazione della griglia in figura 33; le zone colorate in maniera più fitta corrispondono a celle di minori dimensioni. Precisamente, la dimensione orizzontale massima delle celle è di circa 25 m x 30 m nella zona più lontana dallo scarico; la dimensione orizzontale minima è di circa 2 m x 1 m nelle immediate vicinanze dello scarico; il passo di griglia verticale va da un minimo di circa 0,1 m fino ad un massimo di circa 0.7 m, procedendo dalla costa verso il mare aperto.

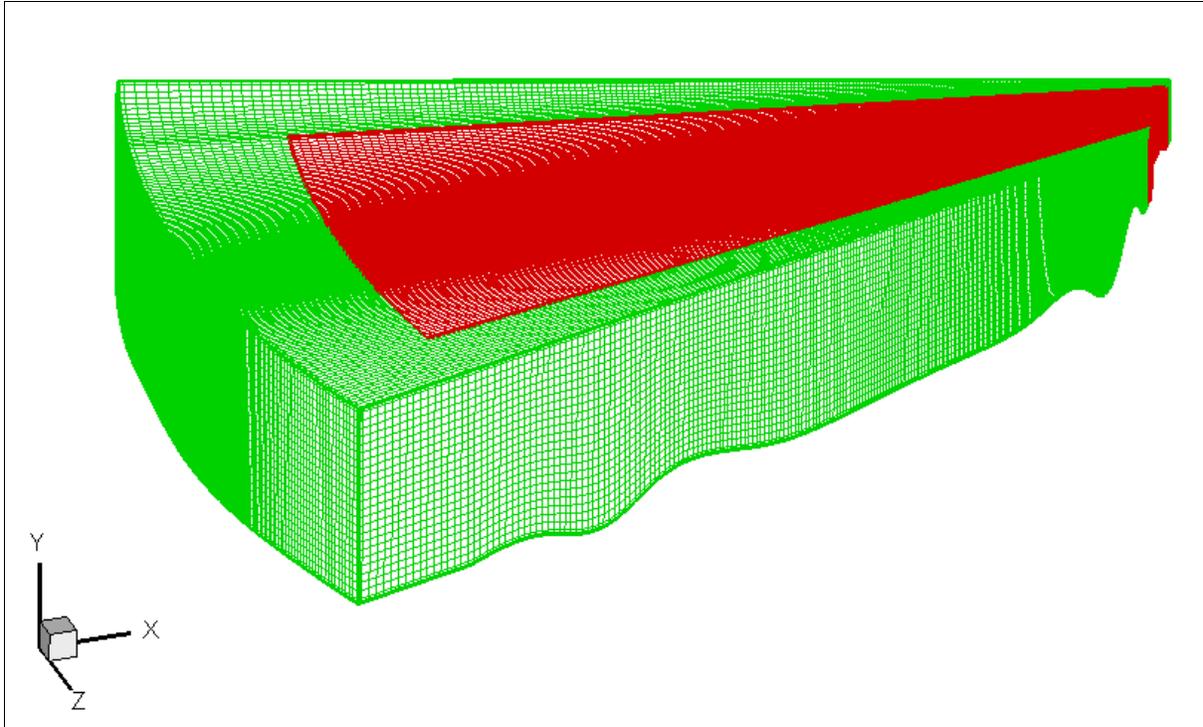


Figura 33 - Vista assonometrica della griglia computazionale. La scala è amplificata nella direzione verticale. La regione in verde corrisponde al buffer, mentre quello in rosso è il reale dominio di interesse.

Anche per questa fase di lavoro, le semplificazioni adottate sono nell'ottica di conservatività. In particolare, nello studio-Elettra [2], è stato osservato che le condizioni maggiormente critiche per il trasporto di temperatura sono quelle in assenza di vento. Infatti, nel caso di venti provenienti dai quadranti orientali, rispettivamente Bora (Nord-Est) e Borino (Est) il mescolamento turbolento indotto dal vento induce uno smorzamento dei gradienti termici verticali e produce un trasporto superficiale di temperatura inferiore rispetto al caso di assenza di vento. Per tale ragione, la nuova simulazione di verifica viene condotta in assenza di vento, quindi la sola forzante esterna riprodotta nelle simulazioni è la forza di Coriolis, associata alla rotazione terrestre.

Inoltre, non è stata considerata la presenza di flusso di calore in corrispondenza dell'interfaccia aria/mare: lo scambio di calore nella maggior parte del tempo di funzionamento dell'impianto tende a ridurre la temperatura superficiale indotta dal getto termico.

In corrispondenza della superficie libera, essendo stata adottata come condizione meteo-marina l'assenza di vento, le condizioni sul campo di velocità sono di *free-slip*: la componente normale alla parete viene posta uguale a zero e alle componenti tangenziali vengono associati valori uguali a quelli assunti sul piano parallelo più interno al dominio.

Come già specificato nella relazione intermedia del presente studio [1], l'aver imposto la velocità verticale uguale a zero equivale a non considerare il possibile sviluppo di fenomeni ondosi, che sarebbero comunque di entità trascurabile ai fini dell'evoluzione dell'idrodinamica del getto.

Per quanto riguarda il fondo, la componente verticale di velocità è nulla mentre le componenti tangenziali vengono ricavate da opportuni modelli che riproducono lo sforzo sulla parete [3].

Sulla parete orientale del dominio, per simulare la presenza delle opere di presa e di restituzione, è stato costruito un apposito piano di inflow: nei nodi della parete interessati dai due impianti si assumono valori fissati del campo di velocità.

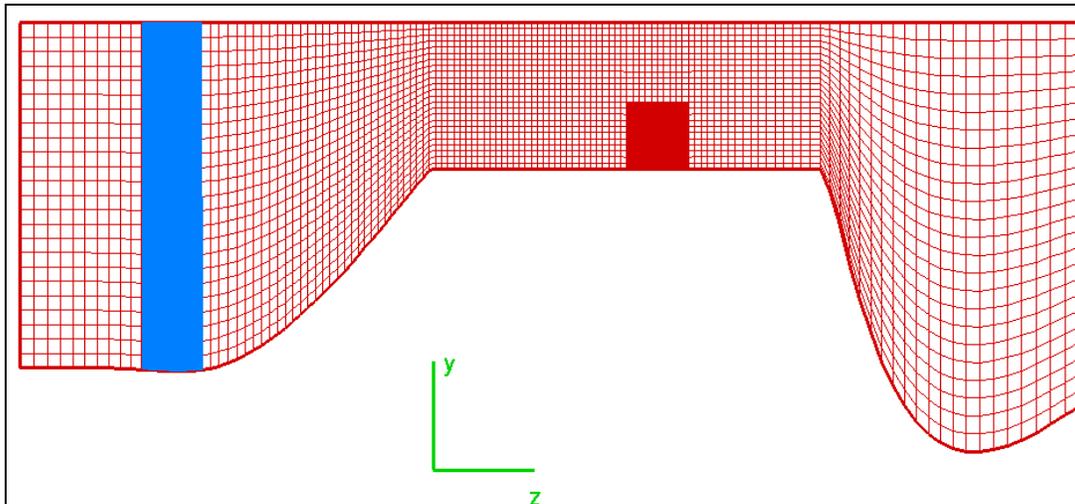


Figura 34 - Parete orientale vista da est. Evidenziata in rosso la regione occupata dalla sezione di scarico ed in blu la sezione di presa. La dimensione verticale è amplificata rispetto a quella orizzontale.

In particolare, sull'opera di restituzione i valori di velocità corrispondono a quelli relativi alla configurazione geometrica individuata nella precedente fase, mentre sulla presa essi sono stati calcolati in modo che la portata uscente dal dominio equilibrasse quella entrante. La sezione di scarico occupa 11 celle in direzione verticale e 10 in direzione trasversale, mentre la sezione di presa è discretizzata mediante 24x8 celle, lungo l'intera estensione verticale della colonna d'acqua. Sulle pareti restanti - nord, sud e ovest - le condizioni vengono imposte sui contorni del buffer e in tutti e tre i casi si considerano nulle le componenti di velocità sulle pareti.

Riguardo alle condizioni al contorno sulla temperatura, sui contorni solidi del dominio (fondale e linea di costa) e sulla superficie marina si considerano condizioni adiabatiche e quindi di gradiente termico nullo. Nella sezione di efflusso si considera un valore di temperatura di 6.5 °C superiore a quello del bacino idrico, mentre nella sezione di presa si considera un comportamento adiabatico. Infine sui contorni di buffer si considera un valore nullo di temperatura. Si tenga presente che i valori delle grandezze termo-fluidodinamiche nella zona di buffer hanno un carattere puramente computazionale e non influenzano lo sviluppo del campo all'interno del dominio di interesse.

3.1 Risultati

Sono di seguito riportati i grafici che mostrano le caratteristiche di diffusione della temperatura nel bacino idrico. I dati sono relativi a circa 30 ore di emissione a partire dall'inizio di funzionamento dell'impianto, tempo sufficiente per il raggiungimento di condizioni idrodinamiche di regime.

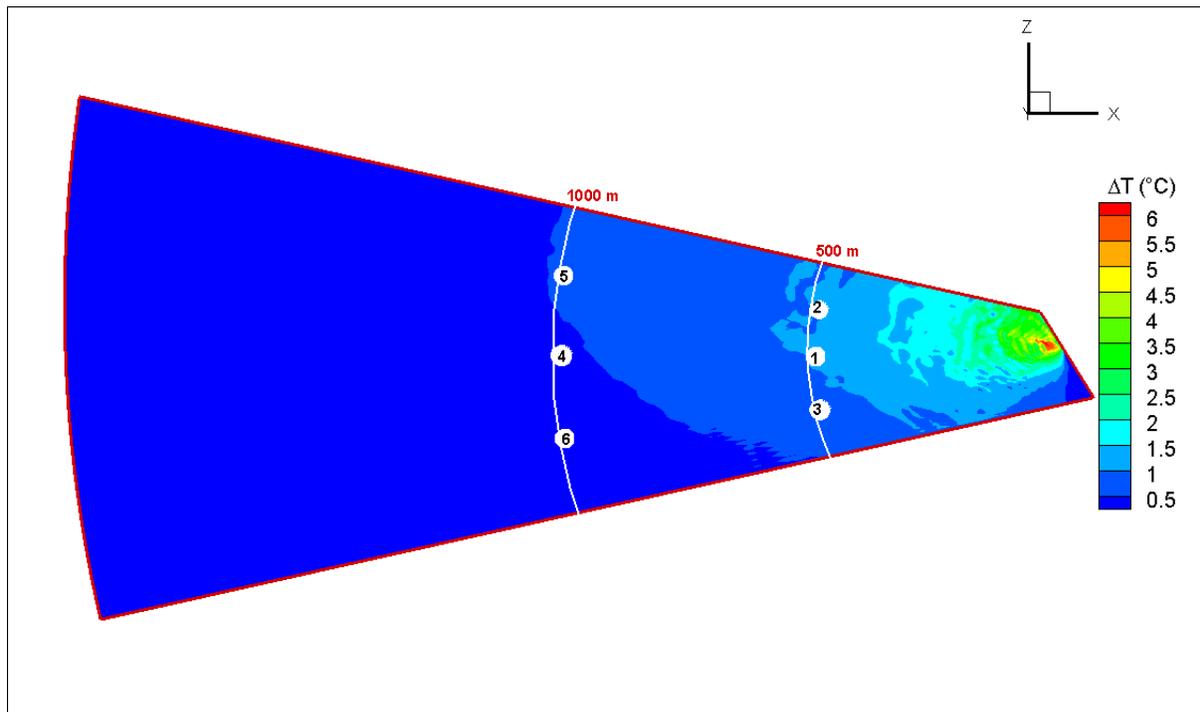


Figura 35 - Mappa spaziale dell'incremento di temperatura dopo un tempo di emissione di 30 ore in corrispondenza della superficie libera. La figura riporta il posizionamento delle sonde numeriche a 500 e a 1000 metri dalla sezione di scarico.

Data la temperatura del getto, superiore a quella del bacino ricevente di 6.5 °C, esso tenderà a risalire rapidamente ed a distribuirsi sulla superficie marina. I valori maggiori di temperatura saranno quindi registrati sulla superficie del mare. La figura 35 riporta una mappa dell'incremento di temperatura in corrispondenza della superficie marina a 30 ore dall'inizio dell'emissione. L'arco di circonferenza esterno tracciato sul grafico indica i punti a 1000 metri di distanza dallo scarico, entro i quali la normativa impone che la ΔT sia inferiore ai 3 °C.

Si evince un comportamento molto simile a quanto già descritto in Studio-Elettra [2]. Valori elevati di temperatura si osservano in una regione molto ristretta in prossimità dell'emissione. A causa della forza di Coriolis, il getto tende a deviare verso Nord e a propagarsi verso Ovest. Come nel caso di scarico orizzontale, l'incremento di temperatura si disperde rapidamente ed è inferiore a 3 °C già ad una distanza di circa 200 metri dall'emissione. L'inclinazione verso l'alto del getto produce un trasposto orizzontale di temperatura inferiore rispetto al caso discusso in [2].

Dalle immagini riportate nelle figure 36 e 37 è possibile evincere le caratteristiche della diffusione del getto lungo una sezione verticale passante per il centro della sezione di scarico. A causa della differenza di temperatura, il flusso risale rapidamente verso l'alto: già entro i primi 100 metri infatti il getto risulta confinato nel primo metro di profondità. Rispetto a quanto osservato in [2], l'inclinazione del getto unita ad una velocità di scarico inferiore provocano una più rapida risalita del getto ed un trasporto orizzontale inferiore.

Dall'ingrandimento si può notare come valori elevati dell'incremento di temperatura rimangano confinati entro i primi 10 metri dallo scarico. Oltre i 50 metri invece i valori registrati di incremento termico sono tra i 3 e i 4 °C e solo lungo il primo metro di profondità. Come si può meglio osservare dalla mappa in figura 36 la condizione di normativa ($\Delta T < 3^{\circ}\text{C}$) risulta verificata già entro i primi 200 metri.

Entro i primi 100 metri, in particolare, si può osservare la presenza di onde interne, tipiche delle condizioni di stratificazione stabile della colonna d'acqua.

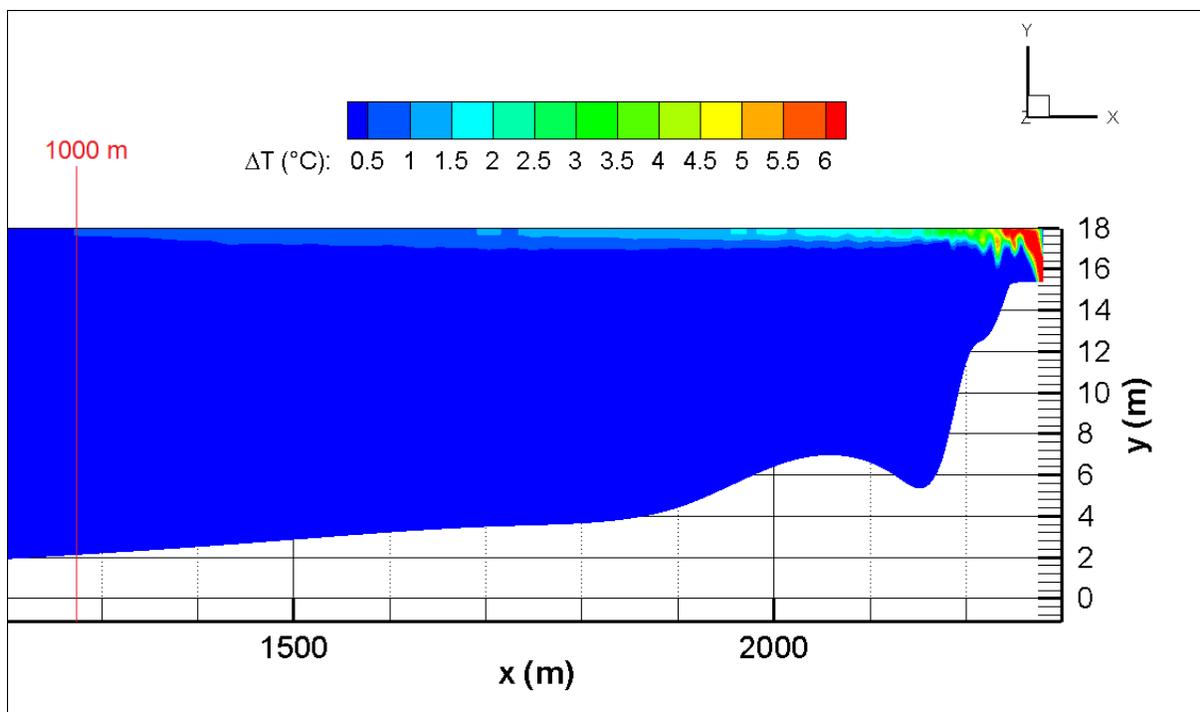


Figura 36- Mappa spaziale dell'incremento di temperatura dopo 30 ore dall'emissione, in una sezione verticale in corrispondenza dello scarico.

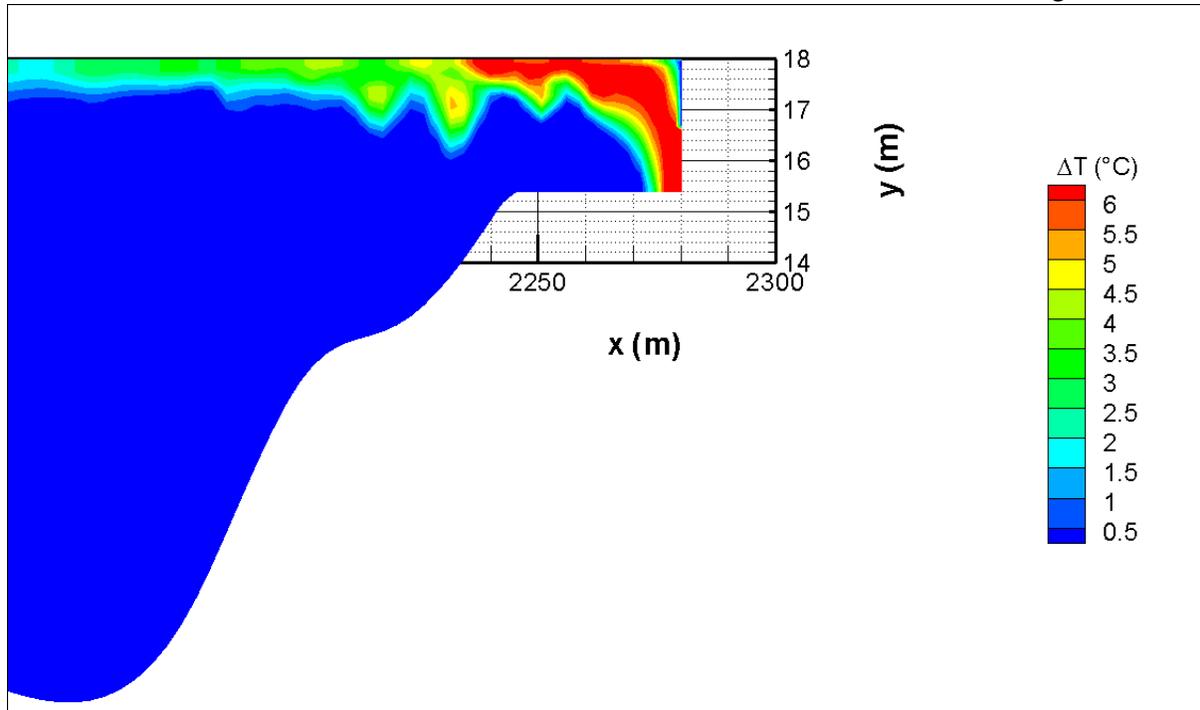


Figura 37- Mappa spaziale dell'incremento di temperatura dopo 30 ore dall'emissione, in una sezione verticale in corrispondenza dello scarico. Ingrandimento nella zona dello scarico.

Le figure 38 e 39 riportano gli andamenti temporali dell'incremento di temperatura, rispettivamente per la terna di sonde disposta a 500 e a 1000 metri dallo scarico. In entrambi i casi i risultati sono relativi ad una finestra temporale compresa tra le 11 e le 30 ore dall'inizio della simulazione e mostrano il raggiungimento di un regime stazionario.

A 500 metri dalla sezione di scarico si osserva un andamento dell'incremento di temperatura tipicamente turbolento con fluttuazioni ad alta frequenza. L'incremento massimo di temperatura registrato è dell'ordine di 1 °C in corrispondenza della sonda posta più a nord, mentre un valore minimo, approssimativamente di 0.5 °C è registrato in corrispondenza della sonda posta a sud.

Nel grafico relativo ai 1000 metri di distanza invece gli andamenti sono più regolari e i valori estremamente bassi, con un massimo di circa 0.6 °C.

Anche in questo caso, i valori decrescono dalla sonda più a nord verso quella più a sud e quest'ultima registra persino valori nulli per un certo tratto.

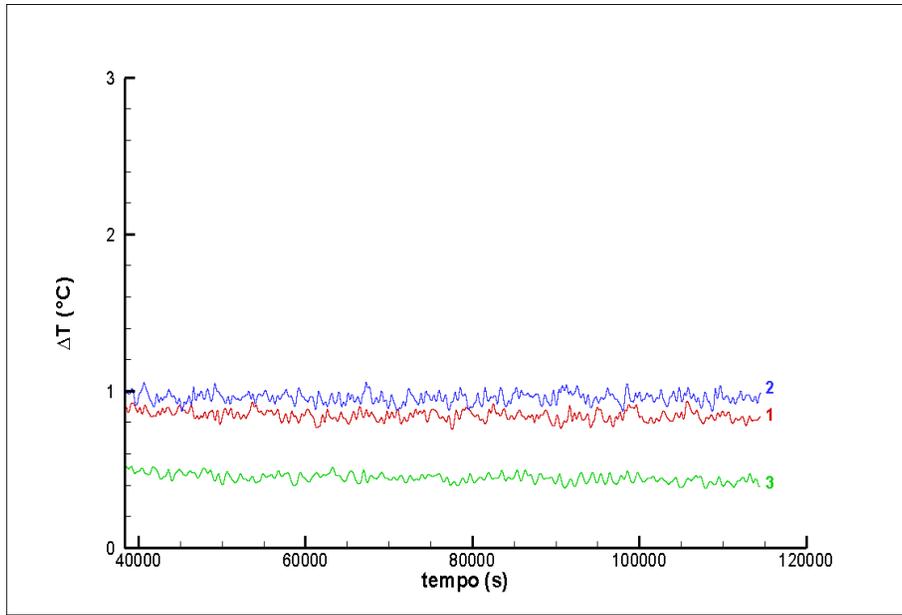


Figura 38 - Andamento dell'incremento di temperatura nel tempo per sonde distanti 500 metri dal punto di emissione.

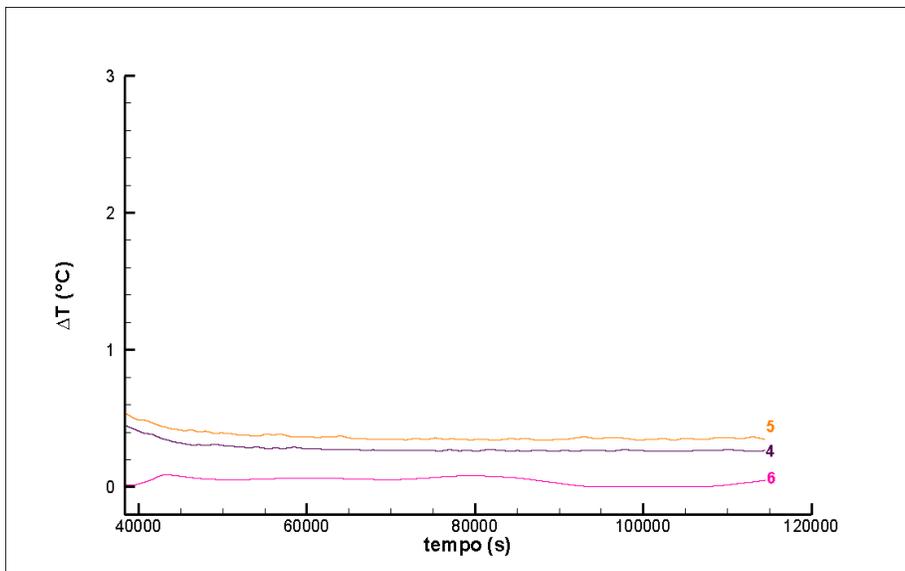


Figura 39 - Andamento dell'incremento di temperatura nel tempo per sonde distanti 1000 metri dal punto di emissione.

Nel precedente Studio Elettra [2], il caso di assenza di vento era risultato l'unico dei casi studiati ove vi potesse essere una influenza dello scarico sulla temperatura dell'acqua alla presa, a causa del possibile instaurarsi di ricircoli tra le due opere.

Come è mostrato nel dettaglio della distribuzione di differenze di temperatura riportato in figura 40, dalle simulazioni effettuate il getto sembrerebbe non interagire con l'acqua nei pressi della sezione di presa, (indicata con P) ove la ΔT è molto prossima allo zero, dal momento che il flusso immesso in mare viene deviato verso nord per effetto della forza di Coriolis.

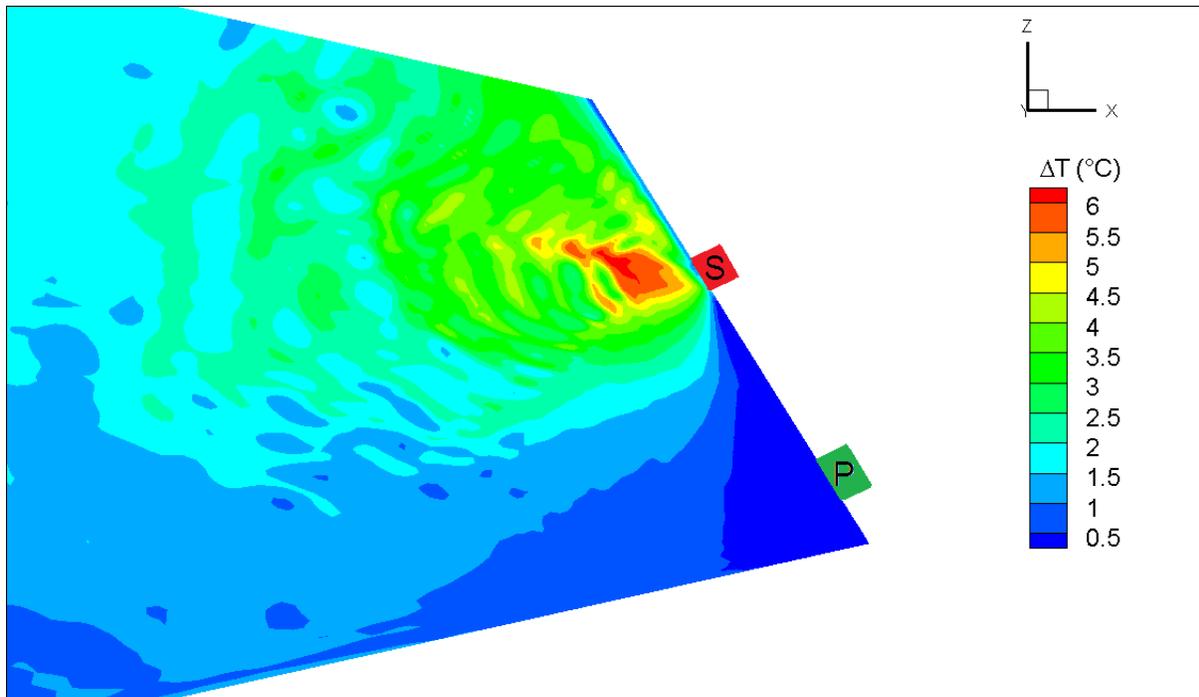


Figura 40 - Mappa spaziale dell'incremento di temperatura dopo 30 ore di emissione in corrispondenza della superficie libera: regione in prossimità delle opere di presa (P) e restituzione (S).

4. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Nel presente studio viene proposta una modifica dello scarico concepito in Progetto-FR, scarico che prevede l'affondamento al di sotto della superficie marina della portata di acqua calda utilizzata nel ciclo di raffreddamento della centrale elettrica CET-Servola.

La configurazione ottenuta nel Progetto-FR, pur rispettando la normativa riguardo agli scarichi di acqua calda in mare, provocava notevoli fenomeni di erosione nella zona del bacino antistante la sezione di restituzione.

Mantenendo le caratteristiche principali del cassone di scarico concepito nel Progetto-FR sono state studiate migliorie da adottare nella zona terminale del cassone.

A tal fine sono state considerate due differenti configurazioni geometriche della sezione di emissione: una configurazione denominata 'a paratoia' ed una configurazione 'a getto inclinato'.

In entrambi i casi si è osservata una notevole riduzione della capacità erosiva del getto rispetto a quella ottenuta con la configurazione come da Progetto-FR. La configurazione a getto inclinato è risultata essere migliore di quella a paratoia.

Nel caso di un angolo di inclinazione pari a 20° e altezza della luce di scarico pari a 1.25 m, le condizioni idrodinamiche del getto sono tali da annullare completamente i potenziali fenomeni erosivi. Questa è la configurazione considerata ottimale.

E' stato studiato il transitorio iniziale, che segue l'avviamento dell'impianto. In particolare sono stati considerati due tipi di avviamento, uno con la portata di regime ed uno con portata frazionata. Quest'ultimo prevede l'avviamento con portata pari a metà di quella di regime e l'immissione della portata rimanente dopo la stabilizzazione del getto iniziale. Lo studio ha mostrato che in entrambi i casi il transitorio è caratterizzato da valori elevati dello sforzo tangenziale al fondo, valori che si riducono nel tempo fino diventare inferiori a quello critico dopo pochi minuti di funzionamento dell'impianto. Nel caso di avviamento parzializzato tale fenomeno si manifesta durante la seconda fase (incremento di portata fino al valore di regime) con valori di sforzo tangenziale visibilmente inferiori rispetto al caso di avviamento con portata di regime.

Tale fenomeno produrrà lo sviluppo di una nuvola di acqua colorata (presumibilmente marrone) durante i primi minuti del transitorio, causata dalla presenza di materiale risospeso nella colonna d'acqua. Tale colorazione svanirà dopo un tempo breve dopo che si siano sviluppate le condizioni di regime idrodinamico.

L'inclinazione del getto unito ad una minore velocità di emissione, causata dall'aumento dell'altezza della luce di scarico migliora le caratteristiche di dispersione del getto rispetto a quanto ottenuto in Studio-Elettra [2]. In particolare nelle condizioni meteo-marine più critiche, cioè nel caso di assenza di vento, l'incremento massimo di temperatura registrato a 1000 metri di distanza dall'emissione è nettamente inferiore a 1°C .

Si ricorda che il presente studio è stato effettuato considerando condizioni conservative, in particolare:

- E' stata considerata una portata pari a $23,800\text{ m}^3/\text{h}$, leggermente inferiore al valore di dimensionamento utilizzato in Progetto-FR ($24,000\text{ m}^3/\text{h}$) ma ben superiore a quella di esercizio regolare dell'impianto ($21,800\text{ m}^3/\text{h}$);
- I fenomeni erosivi e le correlate velocità di erosione sono stati quantificati considerando un valore del coefficiente dell'abaco di Shield inferiore a quello stimato dall'estrapolazione della curve a bassi valori del Numero di Reynolds del sedimento;
- La ricerca della configurazione di scarico ottimale è stata effettuata considerando il fondo orizzontale. Valori inferiori dello sforzo al fondo e dell'associata velocità di erosione sono

attesi nel caso di fondo degradante con l'allontanarsi dalla linea di costa, come effettivamente si ha nella realtà;

- Nei riguardi della verifica della normativa riguardo agli scarichi in mare non sono stati considerati fenomeni di scambio termico acqua-aria;
- Sono state considerate le condizioni di forzante meteo-marine più gravose nei riguardi del trasporto orizzontale del getto termico.

Allegati alla presente relazione sono le animazioni di:

- 1) Evoluzione del campo di velocità durante il transiente con portata di regime;
- 2) Evoluzione durante il transiente dell'andamento del rapporto $\tau(x)/\tau_c$ in funzione della distanza dallo scarico per portata di regime e per portata dimezzata;
- 3) Evoluzione dell'incremento di temperatura sulla superficie marina e rispettivo andamento in corrispondenza delle sonde termiche;
- 4) Evoluzione dell'incremento di temperatura in prossimità dello scarico su una sezione verticale passante per la sezione di scarico.

Lo schema indicativo delle caratteristiche del cassone come modificato sulla base dei risultati del presente studio e una breve discussione sulle nuove caratteristiche idrauliche del cassone stesso sono contenute in una Relazione Tecnica separata.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] *IE-Fluids*, Studio della dispersione e delle capacità erosive del pennacchio termico a valle dell'opera di restituzione dell'impianto di raffreddamento della centrale termica CET-Servola- Relazione Intermedia, Luglio 2009.
- [2] *IE-Fluids*, Studio della dispersione e delle capacità erosive del pennacchio termico a valle dell'opera di restituzione dell'impianto di raffreddamento della centrale termica CET-Servola – Relazione Finale, (primo studio) Ottobre 2008.
- [3] Roman F., Armenio V., Froehlich J., A simple wall-layer model for large eddy simulation with Immersed Boundart Method, *Phys. Fluids*, Oct. 2009.