POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione

Corso di Laurea Magistrale in
Ingegneria della Prevenzione e della Sicurezza nell'Industria di Processo

Analisi fluidodinamica dell'influenza di ostacoli sull'efficienza di sistemi di ventilazione push-pull

Relatore: **Prof. Marco DERUDI**

Co-relatore: **Prof. Renato ROTA**

Tesi di Laurea Magistrale di:

Bruno FERRARI

Matricola 796972

Federico CASARI

Matricola 804884

Anno Accademico 2013 - 2014

Il più grande ringraziamento va al Prof. Marco Derudi, per la disponibilità dimostrata durante tutto questo percorso, per la pazienza e per tutto il tempo che ci ha dedicato.

Un grande ringraziamento va anche al Prof. Renato Rota, che ci ha aiutato nelle primi momenti di smarrimento e a Matteo Rizz8, che pazientemente ci ha guidato alla scoperta del cluster e che ci ha fatto compagnia nell'ultima parte del nostro percorso.

Tra i compagni di università un ringraziamento particolare a Simone, Marco, Dario, Federica e Allegra che hanno reso indimenticabili questi due anni e che si sono dimostrati più che semplici compagni di corso.

Bruno e Federico

Il primo e più importante ringraziamento va a mia madre e a mio padre, che mi hanno sempre guidato, aiutato e supportato con grande pazienza e forza di volontà.

Ringrazio Valentina, che mi è stata sempre accanto e che mi ha aiutato a crescere e a diventare la persona che sono oggi.

Ringrazio tutti i miei amici, anche quelli che nel corso degli anni hanno preso strade diverse e che oggi non sono qui a festeggiare con me, con i quali ho condiviso tanti bei momenti. Ringrazio i gitanti della domenica, i ragazzi della briscola chiamata, Paola, Rafaella, Giovanna, G, Anna, Fabio, Citte, Gek, Pata, Giovanni, Stefania, per l'amicizia dimostratami in tutti questi anni.

Infine ringrazio Federico, che mi ha aiutato a sorridere e a mantenere la calma nei momenti di maggior disperazione.

Bruno

I più importanti ringraziamenti vanno alla mia famiglia, che mi ha sempre supportato, rendendo così possibile la realizzazione del mio percorso universitario.

Ringrazio anche tutti i miei amici e i mie compagni di basket, che hanno sempre creduto in me e mi sono stati da spalla nei momenti più difficili.

Ringrazio infine tutti i compagni di università, perché hanno reso questa esperienza unica e indimenticabile.

Un particolare ringraziamento va a Bruno, che mi ha accolto in questo lavoro di tesi e mi ha spronato a dare il massimo.

Federico

Analisi fluidodinamica dell'influenza di ostacoli sull'efficienza di sistemi di ventilazione push-pull

Bruno Ferrari, Federico Casari

Abstract

Nell'industria di processo spesso si ha la necessità di limitare l'esposizione dei lavoratori a sostanze dannose tramite ventilazione. Per vasche di trattamento aperte è ormai consolidato l'uso di sistemi di ventilazione push-pull, costituiti da un dispositivo di spinta e da una cappa di aspirazione, e caratterizzati da alta efficienza di cattura. Vi sono in letteratura molte linee guida per il design di questi dispositivi [1], ma nessuna contempla una soluzione per mantenere buone prestazioni nel caso si frappongano oggetti tra il dispositivo di push e la cappa di aspirazione. Nella pratica industriale però, in fase di trattamento, si hanno sempre degli oggetti parzialmente immersi che rappresentano, di fatto, degli ostacoli alla ventilazione. Verificata la robustezza del software FDS, inedito per l'analisi di sistemi push-pull, tramite confronto con i dati sperimentali ottenuti da Marzal et al.[2] , si sono poi analizzate le prestazioni di un push-pull al variare delle dimensioni geometriche e della posizione dell'ostacolo nella vasca. Da queste valutazioni si sono quindi delineati gli andamenti dell'efficienza di cattura dell'inquinante emesso in funzione delle dimensioni degli ostacoli e delle correnti di disturbo presenti nell'ambiente.

Introduzione

Gli impianti di ventilazione vengono ampiamente utilizzati nell'industria di processo per poter controllare e limitare la concentrazione in ambiente delle sostanze tossiche, emesse durante i processi di lavorazione, al fine di minimizzare l'esposizione dei lavoratori.

Qualora non sia sufficiente, o sostenibile, una ventilazione globale, si ricorre solitamente alla ventilazione locale, la quale permette di catturare gli inquinanti prima che si diffondano in tutto l'ambiente lavorativo. Un sistema di ventilazione locale spesso utilizzato è il *push-pull* (*Figura I*), la cui peculiarità risiede nel suo funzionamento: degli ugelli (*push*) spingono un getto d'aria, sotto forma di una cortina, verso una cappa di aspirazione (*pull*) in modo tale da convogliare al suo interno gli inquinanti.

Questo sistema di ventilazione trova grande impiego nella rimozione delle sostanze dannose che si liberano dalle superfici delle vasche aperte impiegate nei trattamenti superficiali, come la cromatura, la nichelatura e la zincatura. Tali trattamenti consistono in appositi bagni chimici nei quali vengono immersi gli oggetti da trattare per far acquisire loro nuove proprietà fisico-chimiche. Il grande vantaggio dell'utilizzo dei *push-pull* per queste lavorazioni, oltre all'elevata efficienza di rimozione degli inqinanti, è la possibilità di accedere alla vasca senza l'ingombro di eventuali cappe di aspirazione che ne limiterebbero l'accesso.

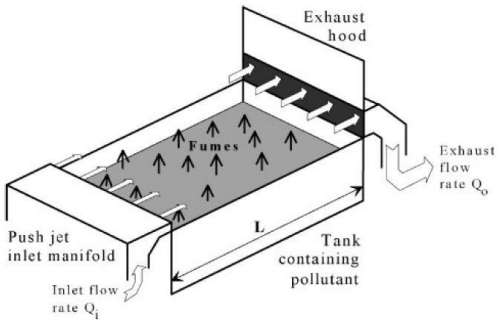


Figura I - Vasca di trattamento ventilata tramite push pull

Lo studio del moto del getto d'aria e della diffusione dell'inquinante, fulcro per una corretta realizzazione del *push-pull*, può essere affrontato in diversi modi: con serie di prove sperimentali, che richiedono però ingenti risorse economiche, con prove in laboratorio su scala ridotta, dalle quali possono però derivare problemi di *scale up*, oppure avvalendosi di un modello quale quelli di fluidodinamica computazionale (*Computational Fluid Dynamics* o CFD), che rappresentano ormai uno strumento largamente impiegato per lo studio di problemi di dispersione di inquinanti e ventilazione.
La CFD permette infatti di valutare il funzionamento di sistemi molto complessi senza dover ricorrere a prove sperimentali, riducendo tipicamente i costi e ampliando gli orizzonti dello studio.
Il presente lavoro di tesi si concentra sull'analisi dell'efficienza di cattura dell'inquinante, da parte della cappa di aspirazione, in funzione delle dimensioni geometriche degli oggetti che possono essere posti nelle vasche durante le lavorazioni. È stato inoltre studiato come questi ostacoli modifichino lo sviluppo del getto d'aria e la conseguente diffusione e cattura dell'inquinante.
Per le simulazioni si è utilizzato, come codice di calcolo, il *software Fire Dynamic Simulator* (FDS) sviluppato dal *National Institute of Standards and Technology* (NIST)[4]

Ventilazione *push-pull*

Il sistema di ventilazione *push-pull* utilizza un getto di spinta ed una cappa aspirante: l'immissione di un getto d'aria da un lato della vasca intercetta l'inquinante emesso e, nel suo moto, lo trasporta a distanze relativamente grandi fin dentro alla cappa di aspirazione posta sul lato opposto della vasca.
Il moto del getto di spinta richiama l'aria ambiente dalle zone limitrofe dando luogo ad un flusso verso la cappa di aspirazione caratterizzato sia da una portata complessiva maggiore di quella iniziale in uscita dagli ugelli del *push*, che da una velocità che decresce con la distanza dall'ugello.
Per la corretta progettazione e realizzazione di questo sistema di ventilazione è necessario dimensionare i diversi elementi che lo compongono; a questo scopo la letteratura [1][3] fornisce le linee guida necessarie.
L'ugello può essere composto sia da un tubo forato, avente un elevato numero di fori inclinati di una angolo compreso tra i 22 e i 45° rispetto alla superficie del liquido, che da una lunga fessura sottile. La caratteristica fondamentale, richiesta dall'elemento di spinta, risiede nella creazione di un getto di aria uniforme, parallelo e radente alla superficie dalla quale proviene l'inquinante, in modo tale che quest'ultimo non abbia modo di diffondersi.

Una volta scelto il tipo di ugello bisogna concentrarsi sul valore dell'inerzia che esso produce. L'inerzia del getto, pari al rapporto tra la velocità d'immissione del getto e la portata volumetrica specifica, deve essere sufficiente a trasportare il contaminante fino alla cappa di aspirazione, senza favorirne l'eccessiva dispersione.
L'American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) suggerisce che il momento cinetico del getto per unità di larghezza del *tank* presso l'ugello debba essere costante e pari a 0,46 [m^4/s^2] per un ambiente senza correnti di disturbo [1]. Se invece fossero presenti velocità di correnti trasversali di oltre 0,4 [m/s] o *vessel* larghi più di 3 [m], l'unica

indicazione fornita è che la portata di spinta deve essere aumentata del 20% [1][8].
Infine è necessario dimensionare la cappa aspirante, che deve essere dotata di una portata di estrazione doppia rispetto alla portata del getto di spinta che arriva a quest'ultima. Per valutare tale portata si può utilizzare l'espressione (1):

$$\frac{Q_x}{Q_0} = 1.2 * \sqrt{\left[\frac{(a * x)}{b} + 0.41\right]} \qquad (1)$$

Dove Q_x è la portata del getto a distanza x dagli ugelli, Q_0 è la portata del getto immessa dagli ugelli, a è un fattore caratteristico dell'ugello, che vale 0.13 per fessure e tubazioni e x è la distanza dall'ugello.
Per quanto riguarda il coefficiente b, quando l'ugello è sospeso liberamente vale la metà della larghezza totale dell'apertura, quando è posto sopra o molto vicino ad una superficie piana b è uguale alla intera larghezza dell'apertura, mentre per tubazioni con fori b è pari alla larghezza di una fessura di area equivalente.
Sono inoltre presenti delle buone norme che suggeriscono diversi accorgimenti da adottare [1][8]. Ad esempio, viene sottolineato come l'elemento di *push* non debba essere più alto dei bordi della vasca, i quali devono avere un'altezza minima di 10 [cm].
I criteri di progettazione ACGIH sono adeguati per vasche larghe fino a 3 [m], se quest'ultimi venissero seguiti per larghezze maggiori si otterrebbero efficienze di cattura troppo basse.
È però possibile estendere le linee guida di design dell'ACGIH per vasche larghe tra i 2.5 e i 4 [m], semplicemente correggendo la portata del getto di spinta e lasciando tutti gli altri parametri inalterati [3]:

$$Q_j = Q_{jACGIH} * \left(\frac{W}{2.5}\right)^{\frac{3}{2}} \qquad (2)$$

Dove W è la larghezza della vasca e Q_{jACGIH} è la portata calcolata seguendo le linee guida AICGIH.
In letteratura non sono però presenti studi approfonditi riguerdanti l'effetto che la presenza di un ostacolo che si interpone tra il getto di spinta e l'aspirazione può avere sull'efficienza dei sistemi *push-pull*. Non sono dunque disponibili correlazioni che permettano di modificare parametri fondamentali del *push-pull*, come portata e velocità del getto d'aria, in funzione del tipo di ostacolo, al fine di mantenere prestazioni elevate.

FDS

Tutte le simulazioni CFD sono state effettuate utilizzando FDS, un codice di calcolo che risolve numericamente una forma semplificata delle equazioni di Navier-Stokes appropriata per le basse velocità (numero di *Mach* < 0.3) [4]. Queste equazioni vengono risolte mediante l'utilizzo dell'approccio LES (*Large Eddy Simulation*) per la modellazione della turbolenza. Questo metodo è basato su un'operazione di filtraggio spaziale tramite l'impiego di un opportuno filtro, la cui dimensione, detta di *cut-off*, permette di separare i diversi tipi di vortici di cui è costituita la turbolenza.
I vortici più grandi dell'ampiezza del filtro vengono calcolati in maniera esplicita, al contrario quelli più piccoli, responsabili della dissipazione di energia all'interno nel fluido, vengono modellati attraverso la teoria di Deardorff.
Le equazioni vengono poi discretizzate tramite un opportuno schema numerico in grado di valutare solo alcuni valori delle variabili d'interesse in corrispondenza di determinati punti della griglia di calcolo, la quale deve essere strutturata. FDS utilizza il metodo delle differenze finite per la risoluzione delle equazioni di conservazione e il metodo dei volumi finiti per la risoluzione dell'equazione del trasporto radiativo.
Nonostante queste equazioni siano principalmente utilizzate per descrivere fenomeni di incendio, come ad esempio gli incendi da pozza, i quali sono caratterizzati da basse velocità, sono state ritenute adatte anche a modellare un sistema di ventilazione *push-pull*.

La semplice geometria della vasca, la quale non contiene superfici curve o elementi di forma particolare, è stata adattata con relativa semplicità alla griglia di calcolo strutturata. Inoltre, anche i bassi valori di portata dell'elemento di spinta, della cappa di aspirazione e dell'inquinante emesso sono state ritenute adatte ad essere modellate con FDS.

Convalida del modello

Prima di procedere alla valutazione delle prestazioni del sistema *push-pull* in presenza di ostacoli, è indispensabile verificare che il codice di calcolo che si vuole utilizzare sia adatto alla realtà da descrivere. Questa fase preliminare è d'importanza cruciale, in particolar modo nel nostro caso, poichè FDS viene solitamente utilizzato per casistiche diverse dai problemi di pura ventilazione.

Per convalidare il modello fluidodinamico è stato ricercato un caso sperimentale, corredato da tutti i dati d'interesse, con il quale confrontare i dati sperimentali con quelli ottenuti attraverso FDS. Grazie a questa prova preliminare è stato possibile verificare non solo l'adattabilità di FDS ad un sistema *push-pull*, ma anche la sua capacità predittiva. È stato dunque ricercato in letteratura un caso sperimentale semplice, focalizzato sull'efficienza di cattura, nel quale la vasca avesse dimensioni tali da essere riproducibile in tempi di simulazione ragionevoli.

Il caso adatto è stato identificato nel lavoro che F.Marzal *et al* [2] hanno condotto utilizzando una vasca lunga 1.8 [m], larga 1.6 [m] ed immettendo in vasca 20 [L/min] di esafluoruro di zolfo mescolato ad aria, in concentrazione non specificata, come tracciante.

Si è deciso di riprodurre una serie di prove sperimentali relativa ad un sistema di ventilazione dotato di un elemento di spinta composto da un tubo forato avente 52 fori dal diametro di 10 [mm]. In particolare si è scelto di analizzare solo i primi tre punti della curva di *Figura II*, cioè quelli caratterizzati dalle efficienze più alte perché rispecchiano le usuali efficienze di utilizzo.

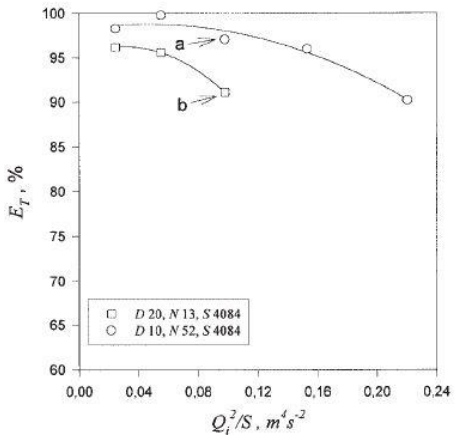


Figura II - Andamento dell'efficienza di cattura, E_T, del caso scelto per la convalida in funzione della portata del getto Q_i e della superficie dell'ugello, S.

Estraendo i dati dal grafico, redatto per una caso con portata di aspirazione costante e pari a 0.2 [m^3/s], si ottengono i dati di *Tabella 1*:

Tabella 1 – Dati caso sperimentale

Caso	η [%]	Velocità getto [m/s]
1	98.39	2.436
2	99.86	3.668
3	97.05	4.893

Prima di procedere è stato necessario introdurre alcune piccole modifiche, per rendere riproducibile il caso con il *software*. In particolare:

- Lo *slot* forato che costituiva il *push* è stato sostituito da una fessura continua, previa modifica della portata mediante apposite correlazioni e utilizzando un angolo di apertura del getto di 15° [6].
- La geometria della cappa d'aspirazione è stata parzialmente ritoccata.
- È stato utilizzato CO come gas inquinante invece del tracciante presente nell'articolo (SF_6), poiché quest'ultimo non è presente nel *database* di FDS.

- L'inquinante non viene immesso tramite una piastra forata, ma in maniera uniforme da tutta la superficie.
- I condotti di spinta e aspirazione sono stati eliminati, in quanto ritenuti ininfluenti nella simulazione.

Poiché la rappresentazione in FDS di un flauto forato avrebbe introdotto diffficoltà nella scrittura, dato che il programma si basa su *mesh* con celle esaedriche, quest'ultimo è stato sostituito da una fessura continua [6] le cui dimensioni sono state calcolate grazie all'ausilio del diametro espanso.

Una volta costruiti dominio e geometria sono state effettuate delle simulazioni preliminari allo scopo di capire i tempi necessari affinché il sistema *push-pull* andasse a regime.

In *Figura III* è possibile vedere la geometria della vasca simulata, con il relativo sistema di ventilazione *push-pull.*

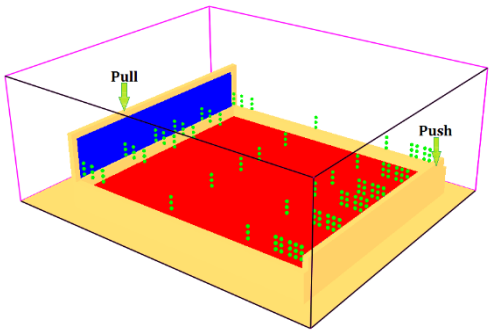


Figura III – Esempio di geometria della vasca simulata

In questa fase sono stati riscontrati alcuni problemi del *software* FDS 6.0, nella gestione della velocità di immissione dell'inquinante molto basse, che sono state successivamente risolte dall'utilizzo della nuova versione del codice, FDS 6.1.2.

Sono state poi eseguite delle verifiche riguardanti la chiusura del bilancio di materia, tramite il controllo del residuo così definito:

$$\text{Residuo} = CO_{IN} - (CO_{aspirato} + CO_{perso\ dalle\ pareti}) \quad (3)$$

dove tutti i termini sono portate massiche del tracciante espresse in [kg/s]. Tale valore deve attestarsi attorno allo zero e, in ogni caso, assumere valori di almeno un ordine di grandezza inferiore alle portate di tracciante introdotto e aspirato.

Data la necessità di utilizzare una *mesh* abbastanza fine e vista la simmetria dei sistemi *push-pull* è stata poi approfondita la possibilità di sfruttare quest'ultima caratteristica. FDS consente infatti di simulare solo metà dominio, specchiando l'altra parte, con evidente risparmio di risorse computazionali. Così facendo si è notato come i risultati, in termini di profili di velocità e di efficienza di cattura, non subissero cambiamenti sensibili, nemmeno al variare delle dimensioni delle celle.

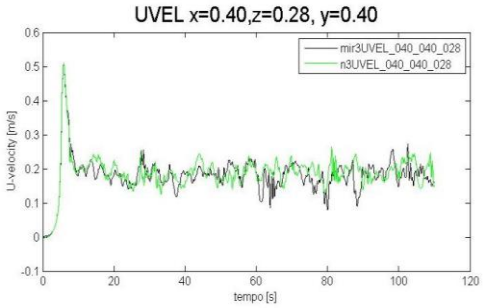


Figura IV - Andamento della componente di velocità diretta come l'asse di simmetria della vasca, nel punto di coordinate (0.40, 0.28, 0.40). L'andamento in nero è quello relativo all'utilizzo della simmetria, quello in verde è relativo alla vasca simulata nella sua totalità.

In *Figura IV* si vede come il profilo di velocità nero, relativo all'utilizzo della simmetria, sia quasi sovrapponibile, o comunque mediamente confrontabile con quello verde, rappresentante la vasca simulata nella sua interezza. In maniera analoga si comportano anche le curve riguardanti le altre componenti della velocità e l'inquinante aspirato. Per questi motivi si è deciso di sfruttare la simmetria in tutte le simulazioni successive a questa analisi.

Sulla base di quanto ricavato fino a questo punto, sono state condotte delle simulazioni preliminari di alcune delle prove di F.Marzal *et al* [2], con domini abbastanza piccoli, i quali comprendevano poco spazio libero sia intorno che sopra la vasca. Nonostante i buoni risultati legati al primo punto, gli altri due punti non risultavano coerenti con i risultati sperimentali.

Di conseguenza, viste le risposte ottenute, si è deciso di allargare il dominio e di simulare nuovamente gli stessi tre casi con uno spazio libero intorno alla vasca più grande, in modo tale da consentire lo sviluppo di ricircoli e di richiami d'aria. Tale ampliamento ha però portato solo un piccolo beneficio nei risultati, ciò nonostante si è deciso di mantenerlo.

Successivamente è stata indagata quale fosse la dimensione limite delle celle al di sotto della quale non fossero riscontrabili significativi miglioramenti nell'accuratezza dei risultati. Infatti, mentre emergono sensibili miglioramenti passando da celle con lati di 4 [cm] a celle di 2 [cm], riducendo ulteriormente a 1 [cm] il lato della cella non sono state riscontrate significative variazioni.

Infine, poiché lo scarto tra i dati sperimentali e quelli ottenuti con FDS è apparso condizionato dall'eccessiva portata d'aria che veniva convogliata in cappa, si è provato a variare l'angolo di apertura del semi-getto di *push*. Tale parametro, compreso in un range tra 12° e 15° [7], era stato inizialmente assunto pari al valore limite di 15°. Questo però, assieme alle semplificazioni legate all'impossibilità di rappresentare il tubo forato, ha contribuito allo sviluppo di portate troppo alte rispetto a quelle sperimentali. Per questo motivo è stata diminuita l'apertura del semi-getto fino a 12° in modo tale da limitare l'eccessivo *entrainment* di aria. Grazie a questo accorgimento l'efficienza di cattura è migliorata sensibilmente, come si vede in *Figura V*.

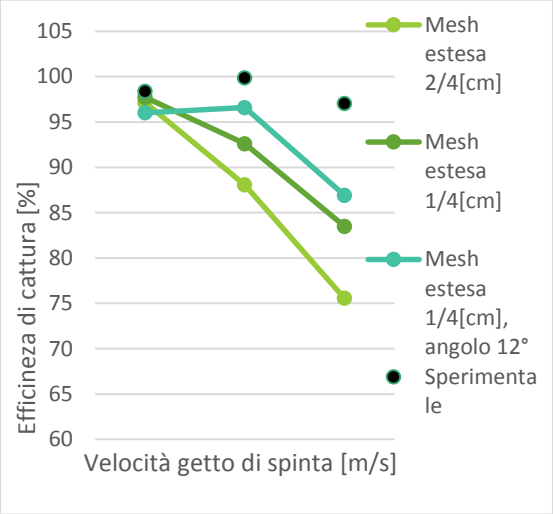


Figura V - Andamento dell'efficienza di cattura in funzione della velocità; in particolare i tre punti rappresentano tre casi utilizzati per la convalida.

FDS è risultato quindi adatto alla riproduzione di un sistema *push-pull*, permettendo inoltre di sfruttare l'eventuale simmetria dei casi analizzati. Per quanto riguarda la *mesh* è consigliabile, almeno nelle zone dove si concentrano i maggiori gradienti di velocità, avere celle di dimensioni di 1 [cm].

Risultati

Accertato che FDS è adatto alla simulazione di sistemi di ventilazione, è stata analizzata l'influenza di diversi parametri sull'efficienza di cattura.

È stata utilizzata una vasca dalle dimensioni leggermente diverse rispetto a quelle che caratterizzavano il caso sperimentale della convalida. È stata infatti riprodotta una vasca lunga 2 [m] e larga 4 [m] in modo tale da porsi ai limiti dei valori consigliati dalle norme ACGIH. Come nel caso di convalida è stata utilizzata una *mesh* più fitta nella zona centrale con passo di 0.01 [m] mentre appena sopra di questa il passo viene prima allargato a 0.02 [m] e poi a 0.04 [m]. Inoltre le dimensioni di cella sono state aumentate anche sotto la superficie

della vasca, a causa della scarsa influenza che ha questa zona, come già sottolineato.
Tale configurazione è visibile in *Figura VI:*

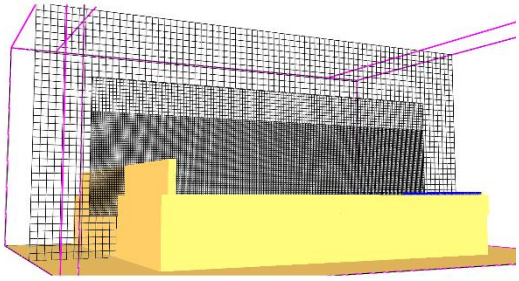


Figura VI - Impostazione della griglia di calcolo valida per tutte le simulazioni

L'ostacolo utilizzato nelle simulazioni è costituito da un parallelepipedo, di cui è descritta solo la parte che sporge dalla superficie della vasca, perché la parte sommersa nel liquido di trattamento non influenza la ventilazione e non è quindi di nostro interesse.
Infine, per permettere l'uso della simmetria, il centro dell'ostacolo è sempre posto a metà della larghezza della vasca e, come quest'ultima, simulato per metà.
Come tracciante si utilizza il monossido di carbonio, il quale viene introdotto attraverso la superficie della vasca. Gli elementi di *push* e di *pull*, sono larghi come l'intera vasca, mentre sono alti rispettivamente 0.03 e 0.15 [m]. La portata di spinta è pari a Q_x=0.267 [m^3/s] mentre quella di aspirazione, ricavata tramite le formule proposte dall'ACGIH [1] è pari a Q_a=3.048 [m^3/s].
Dopo aver controllato l'andamento a regime dell'aspirazione del tracciante da parte della cappa, l'efficienza viene valutata come media sugli ultimi 30 [s] di simulazione. Tale operazione permette di ricavare un valore ragionevolmente indipendente dalle oscillazioni istantanee e rappresentante le *performance* del sistema *push-pull* per il caso considerato.
Per ogni caso vengono inoltre controllati i residui, che devono sempre essere di almeno un ordine di grandezza inferiori rispetto alle altre portate in gioco. Sono quindi state analizzate le prestazioni del *push-pull* al variare della larghezza e dell'altezza dell'ostacolo. Tali parametri, così come l'eventuale presenza di correnti d'aria di disturbo all'interno dell'ambiente di lavoro, non sono controllabili e sono quindi indipendenti dalla regolazione del *push-pull*.
Non viene invece presa in considerazione la lunghezza dell'ostacolo perché questa non influenza in maniera significativa la capacità di cattura del sistema di ventilazione [3].

Tabella 2 – Casi simulati riguardanti parametri non controllabili

Nome caso	Altezza ostacolo [m]	Larghezza ostacolo [m]	Distanza dal *push* [m]	Corrente di disturbo [m/s]	Efficienza [%]
h025w050d075	0.25	0.50	0.75	assente	99.66
h025w150d075	0.25	1.50	0.75	assente	98.89
h025w250d075	0.25	2.50	0.75	assente	99.01
h025w400d075	0.25	4.00	0.75	assente	98.67
h030w400d075	0.30	4.00	0.75	assente	98.95
h035w400d075	0.35	4.00	0.75	assente	97.73
h050w400d075	0.50	4.00	0.75	assente	95.67

Nome caso	Altezza ostacolo [m]	Larghezza ostacolo [m]	Distanza dal *push* [m]	Corrente di disturbo [m/s]	Efficienza [%]
h075w400d075	0.75	4.00	0.75	assente	95.33
h025w050d075v	0.25	0.50	0.75	0.25	99.48
h025w150d075v	0.25	1.50	0.75	0.25	98.07
h025w250d075v	0.25	2.50	0.75	0.25	98.53
h025w400d075v	0.25	4.00	0.75	0.25	96.00
h030w400d075v	0.30	4.00	0.75	0.25	95.87
h035w400d075v	0.35	4.00	0.75	0.25	95.34
h050w400d075v	0.50	4.00	0.75	0.25	85.34
h075w400d075v	0.75	4.00	0.75	0.25	55.00

Dalla *Tabella 2* emerge che, in assenza di correnti di disturbo, la larghezza dell'ostacolo non influenza le prestazioni del sistema di ventilazione, mentre all'aumentare dell'altezza dell'ostacolo l'efficienza di cattura cala, anche se in maniera poco marcata.
In presenza di una corrente d'aria di disturbo opposta al getto di spinta si nota che l'influenza della larghezza è ancora trascurabile, mentre l'incremento dell'altezza influisce significativamente sulle prestazioni del *push-pull*.
Anche l'analisi dei parametri controllabili risulta molto interessante, in particolare si considerano la posizione dell'ostacolo rispetto all'ugello del getto di spinta e la riduzione della portata aspirata.

Tabella 3 – Casi simulati riguardanti parametri controllabili

Nome caso	Altezza ostacolo [m]	Larghezza ostacolo [m]	Distanza dal *push* [m]	Corrente di disturbo [m/s]	Riduzione aspirazione	Efficienza [%]
h025w400asp	0.25	4.00	0.75	0.25	30%	78.30
h030w400asp	0.30	4.00	0.75	0.25	30%	68.00
h035w400asp	0.35	4.00	0.75	0.25	30%	62.30
h050w400asp	0.50	4.00	0.75	0.25	30%	54.70
h025w050asp	0.25	0.50	0.75	0.25	30%	97.44
h025w150asp	0.25	1.50	0.75	0.25	30%	91.90
h025w250asp	0.25	2.50	0.75	0.25	30%	86.60
h025w400d040	0.25	4.00	0.40	assente	assente	99.70

Nome caso	Altezza ostacolo [m]	Larghezza ostacolo [m]	Distanza dal *push* [m]	Corrente di disturbo [m/s]	Riduzione aspirazione	Efficienza [%]
h025w400d040v	0.25	4.00	0.40	0.25	assente	98.97
h025w400d040asp	0.25	4.00	0.40	0.25	30%	95.52
h025w400d110	0.25	4.00	1.10	assente	assente	96.60
h025w400d110v	0.25	4.00	1.10	0.25	assente	99.51
h025w400d110asp	0.25	4.00	1.10	0.25	30%	95.22

I dati ottenuti e riportati in *Tabella 3* evidenziano che una riduzione del 30% della portata di aspirazione è eccessiva, poichè non permette di mantenere elevate le efficienze di cattura.

La modifica della posizione dell'ostacolo non porta altro vantaggio se non l'eventuale miglioramento delle prestazioni, la regolazione della cappa d'aspirazione verso portate più basse, comporta ovviamente anche costi operativi più bassi.

Conclusione

Il lavoro svolto ha confermato come le dimensioni dell'ostacolo influenzino le prestazioni dei sistemi di ventilazione *push-pull*. Sebbene l'efficienza di cattura non risenta della larghezza dell'ostacolo, e sia poco influenzata dall'altezza di quest'ultimo in condizioni ambientali di quiete, in presenza di correnti di disturbo la situazione cambia significativamente. Infatti, introducendo una debole corrente d'aria, sempre presente in un normale ambiene di lavoro, si nota come l'altezza dell'ostacolo influenzi in maniera più marcata l'efficienza di cattura, diminuendo le prestazioni del sistema di ventilazione in maniera proporzionale al crescere dell'altezza.

La larghezza, al contrario, continua ad essere un paramentro poco significativo, non inficiando le prestazioni del *push-pull* nemmeno per ostacoli di larghezza paragonabile a quella della vasca.

Nelle simulazioni si nota che le ottime prestazioni dei *push-pull* sono dovute soprattutto all'elevata portata della cappa di aspirazione. È stata dunque ridotta del 30% rispetto al valore consigliato dall'ACGIH, anche per capire se vi fossero i margini per diminuire i costi operativi. Queste prove hanno confermato l'evidente influenza dell'altezza dell'ostacolo sull'efficienza di captazione. Inoltre, contrariamente a quanto accade seguendo le linee guìda ACGIH, aumentando la larghezza dell'ostacolo si notano anche delle variazioni nell'efficienza di cattura.

Infine la posizione dell'ostacolo non ha alcun effetto significativo sulle prestazioni del sistema di venitlazione; infatti, né avvicinando l'ostacolo al *push*, né allontanandolo si notano differenze, anche in presenza di correnti di disturbo e in caso di riduzione della portata aspirante.

Bibliografia

[1] **ACGIH.** *Industrial Ventilation: A Manual of Recommended Practice for Design.* 28th. Cincinnati : ACGIH, 2013.

[2] **F. Marzal, E. Gonzalez, A. Minana, A. Baeza.** Determination And Interpretation of Total and Transversal Linear Efficiency in Push-Pull Ventilation System for Open Surface Tanks. *The Annals of Occupational Hygiene.* 2002, Vol. 46, 7, p. 629-635.

[3] **R. Rota, G. Nano, L. Canossa.** Design Guidelines for Push-Pull Ventilation System Through Computational Fluid Dynamics Modelling. *American Industrial Hygiene Association.* 2001, Vol. 62, 2, p. 141-148.

[4] **K. McGrattan, S.Hostikka et al.** *Fire Dyamics Simulator Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model.* s.l. : National Institute of Standards and Technology Special Publication , 2014. 1018.

[5] **G. P. Forney,** *Smokeview, A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data Volume I: User's Guide.* s.l. : National Institute of Standards

[6] **Awbi, H. B.** *Ventilation of Buildings.* London : Spon Press, 2003.

[7] **H. D. Goodfellow, E. Tahti.** *Industrial Ventilation Design Guidebook.* Toronto : Academic Press, 2001.

[8] **G. Nano, R. Rota,** *Principi di ventilazione industriale.* ADII - Associazione italiana degli igienisti industriali : Editors G.Sesana, C.Sala

Indice

Indice 1
Elenco delle figure 6
Elenco delle tabelle 9
Introduzione 10
Stato dell'arte 13
1.1 Introduzione 13
1.1.1 Ventilazione locale e globale 13
1.1.2 Ventilazione *push-pull* 15
1.2 Principio di funzionamento 17
1.2.1 Cappa d'aspirazione 18
1.3 Valutazione della portata da aspirare 21
1.4 Dimensionamento dispositivo di spinta 22
1.4.1 Perdite di carico 23
1.4.2 Inclinazione dei fori 26
1.4.3 Numero dei fori 27
1.4.4 Campo di moto generato dal push 29
1.4.5 Inerzia del getto 33
1.5 Dimensionamento della cappa aspirante 35
1.6 Linee guida ACGIH 37
1.7 Estensione linee guida ACGIH 40
1.7.1 Influenza larghezza della vasca 40
1.7.2 Correnti d'aria di disturbo 41
1.7.2.1 Legame tra corrente d'aria e bordi della vasca 41
1.7.2.2 Contrastare le correnti di disturbo 42
1.7.3 Influenza del momento del getto 43
1.8 Influenza degli ostacoli 43
1.8.1 Effetto dell'ostacolo 44
1.8.2 Geometria dell'ostacolo 46
1.8.3 Influenza della lunghezza 46
1.8.4 Influenza della larghezza 46
1.8.6 Influenza della posizione 47

1.8.7 Revisione 48
Materiali e metodi 49
2.1 La fluidodinamica computazionale, CFD 49
2.1.1 *Preprocessing* 51
2.1.1.1 *Mesh* 51
2.1.2 Solver 52
2.1.2.1 Metodo delle differenze finite 53
2.1.2.2 Metodo dei volumi finiti 53
2.1.2.3 Metodo degli elementi finiti 53
2.1.3 *Postprocessing* 54
2.1.4 Analisi di sensitività 54
2.2 Equazioni di trasporto 55
2.2.1 Equazioni di continuità 55
2.2.2 Equazione di trasporto delle specie chimiche 55
2.2.3 Equazione di conservazione della quantità di moto 56
2.2.4 Equazione di conservazione dell'energia 57
2.2.5 Equazioni costitutive 59
2.2.5.1 Legge di Fick 59
2.2.5.2 Legge di Fourier 60
2.2.5.2 Legge di Newton 60
2.2.5.3.Equazione di stato 61
2.2.6 Equazioni di Navier-Stokes 61
2.3 Modellazione numerica turbolenta 62
2.4 Fire dynamics simulator – FDS 63
2.4.1 Descrizione del modello 64
2.4.2 Caratteristiche del modello 65
2.4.2.1 Modello idrodinamico 65
2.4.2.2 Modello di combustione 66
2.4.2.3 Modello radiativo 67
2.4.2.4 Processi e processori in parallelo 68
2.4.2.5 Condizioni al contorno 69
2.4.3 Approccio LES 69

2.5 Smokeview 74
2.5.1 Introduzione 74
2.5.2 Potenzialità 74
2.5.3 Tracers 75
2.5.4 *Post processing* 76
2.5.5 Funzionalità aggiuntive 76
Convalida del modello 78
3.1 Necessità di una convalida 78
3.2 Caso studio per la convalida 79
3.2.1 Geometria della vasca 79
3.2.2 Tracciante ed efficienza 80
3.2.3 Caso analizzato 81
3.3 Adattamento del caso sperimentale 84
3.3.1 Geometria del *push* 84
3.3.2 Getto di spinta 84
3.3.3 Tracciante 88
3.3.4 Cappa d'aspirazione e altre semplificazioni 89
3.4 Simulazioni preliminari 90
3.4.1 Impostazione 90
3.4.1.1 *Mesh* 90
3.4.1.2 Vasca di trattamento 90
3.4.1.3 Ventilazione 91
3.4.2 Tempistiche 91
3.4.2.1 Tempistiche con celle più piccole 94
3.4.3 Introduzione dell'inquinante 96
3.4.3.1 Portata tracciante 96
3.4.3.2 Portata aspirata a regime 97
3.4.3.3 Bilancio sul monossido di carbonio 98
3.4.4 Influenza della posizione del getto di spinta 98
3.5 Simmetria del dominio computazionale 100
3.5.1 Ventilazione senza inquinante 100
3.5.2 Ventilazione con inquinante 101

3.5.2.1 Variazione dimensione di cella 102
3.6 Fase finale di convalida 105
3.6.1 Estensione del dominio 105
3.6.1.1 Dimensioni 105
3.6.1.2 Nuova *mesh* 106
3.6.1.3 Confronto *mesh* e *mesh* estesa 107
3.6.2 Indipendenza dalla *mesh* 108
3.6.3 Modifica dell'angolo di apertura del getto 110
3.6.3.1 Causa della perdita di efficienza 110
3.6.3.2 Riduzione della portata del getto di spinta 111
Risultati e discussione 113
4.1 Impostazione e dominio 113
4.1.1 Geometria 113
4.1.2 *Mesh* 114
4.1.3 Dominio 115
4.1.4 Ostacolo 116
4.1.5 Tracciante 117
4.1.6 Ventilazione 117
4.1.7 Analisi dei risultati 118
4.2 Configurazioni esaminate 119
4.2.1 Parametri non controllabili 119
4.2.2 Parametri controllabili 120
4.3 Parametri non controllabili 122
4.3.1 Influenza della larghezza 122
4.3.2 Influenza dell'altezza 122
4.3.3 Correnti di disturbo 124
4.4 Parametri controllabili 129
4.4.1 Portata di aspirazione 129
4.4.1.1 Influenza dell'altezza con portata aspirante ridotta 130
4.4.1.2 Influenza della larghezza con portata aspirante ridotta 131
4.4.2 Posizione dell'ostacolo 133
Conclusioni 134

Appendice 138

Elenco delle figure

FIGURA 1 - CONFIGURAZIONE NON ADATTA DELLA CAPPA ASPIRANTE 15
FIGURA 2 – CONFRONTO TRA GETTO E ASPIRAZIONE..... 17
FIGURA 3 – PROFILI VELOCITÀ DI ASPIRAZIONE DI UN CONDOTTO CIRCOLARE..... 18
FIGURA 4 – PROFILI VELOCITÀ DI ASPIRAZIONE DI UN CONDOTTO CIRCOLARE FLANGIATO..... 19
FIGURA 5 – PROFILI DI VELOCITÀ IN FUNZIONE DELLA DISTANZA DALL'APERTURA, X, E DELL'ALTEZZA DEL DISPOSITIVO, S, ... 20
FIGURA 6 – (A) TUBO FORATO USATO NELL'ELEMENTO DI SPINTA. (B) PLENUM AL QUALE È ATTACCATO IL TUBO FORATO 22
FIGURA 7 – CONFIGURAZIONE DEL DISTRIBUTORE 23
FIGURA 8 – FLUSSO DI ARIA IN USCITA DAL PUSH..... 26
FIGURA 9 – PROFILI DI VELOCITÀ DI TRE GETTI CIRCOLARI CONFLUENTI 27
FIGURA 10 – PROFILI DI VELOCITÀ DI TRE GETTI CIRCOLARI CONFLUENTI 27
FIGURA 11– PROFILI DI VELOCITÀ DI CINQUE GETTI CIRCOLARI CONFLUENTI 28
FIGURA 12 – FLUSSI DI ARIA PRESENTI IN UN SISTEMA DI VENTILAZIONE PUSH-PULL..... 29
FIGURA 13 – FOTO CHE EVIDENZIANO QUATTRO DIVERSE CONDIZIONI DI ASPIRAZIONE, OTTENUTE TRAMITE L'ACCOPPIAMENTO DI FUMO COME GAS TRACCIANTE, IN USCITA DALL'ELEMENTO DI SPINTA, E DI UNA TECNICA DI RILEVAMENTO LASER..... 32
FIGURA 14 - FOTO CHE EVIDENZIANO QUATTRO DIVERSE CONDIZIONI DI ASPIRAZIONE, OTTENUTE TRAMITE L'ACCOPPIAMENTO DI FUMO COME GAS TRACCIANTE, IN USCITA DALLA SUPERFICIE DELLA VASCA, E DI UNA TECNICA DI RILEVAMENTO LASER 32
FIGURA 15 – DATI CARATTERISTICI PER LA PROGETTAZIONE DI SISTEMI DI ASPIRAZIONE PUSH-PULL AVENTI LARGHEZZA MASSIMA 3 METRI 37
FIGURA 16 – EFFICIENZA DI CATTURA IN FUNZIONE DELLA LARGHEZZA DELLA VASCA 40
FIGURA 17 – EFFICIENZA DI CATTURA IN FUNZIONE DELLA VELOCITA DELLE CORRENTI D'ARIA DI DISTURBO 42
FIGURA 18 – EFFICIENZA DI CATTURA IN FUNZIONE DEL MOMENTO SPECIFICO DEL GETTO PROVENIENTE DELL'ELEMENTO DI SPINTA 43
FIGURA 19 – CAMPI DI MOTO DI TRE DIFFERENTI CASI DI VENTILAZIONE PUSH-PULL 44
FIGURA 20 – CAMPO DI VELOCITÀ IN ASSENZA DI OSTACOLI..... 45
FIGURA 21 – PROFILI DI VELOCITÀ IN PRESENZA DI UN OSTACOLO..... 45
FIGURA 22 - ANDAMENTO DEI TEMPI DI CALCOLO IN FUNZIONE DEL NUMERO DI PROCESSI UTILIZZATO..... 68
FIGURA 23 – ESEMPIO DI SLICE DI VELOCITÀ PER UN SISTEMA PUSH-PULL PRIMITIVO A REGIME 75
FIGURA 24 - VISUALIZZAZIONE DELLA *MESH* ADOTTATA SUI TRE PIANI X, Y E Z..... 77
FIGURA 25- SCHEMA DELL'IMPIANTO UTILIZZATO PER L'ATTIVITÀ SPERIMENTALE..... 79
FIGURA 26 - CURVE DI EFFICIENZA DI CATTURA DEL CASO SPERIMENTALE..... 82
FIGURA 27 - SCHEMA DELLO SVILUPPO FLUIDODINAMICO DA UN UGELLO FORATO..... 85
FIGURA 28 - RAPPRESENTAZIONE SCHEMATICA DI UNA SEZIONE DEL GETTO FUORIUSCENTE DA UN FORO DELL'UGELLO DI SPINTA 87
FIGURA 29 - POSIZIONE DEI SENSORI DI VELOCITÀ POSTI SOPRA LA VASCA 92
FIGURA 30 – ANDAMENTO DELLA U-VELOCITY, COMPONENTE DELLA VELOCITÀ DIRETTA LUNGO L'ASSE X. GLI ANDAMENTI SONO RELATIVI AI SENSORI POSTI NEI PUNTI (0.30, 0.78, 0.24) E (1.80, 0.78, 0.24)..... 93

FIGURA 31 - ANDAMENTO DELLA VELOCITÀ IN TRE POSIZIONI DIVERSE, RISPETTIVAMENTE: (0.30, 0.78, 0.24), (0.30, 0.78, 0.32). (0.30, 0.40, 0.24), (1.80, 0.78, 0.24) E (1.80, 0.40, 0.24), ... 94
FIGURA 32 - PROFILI DELLA *U-VELOCITY* RELATIVI AL SENSORE POSTO IN (0.30, 0.40, 0.24), CIOÈ VICINO AGLI UGELLI 95
FIGURA 33 – PROFILI DELLA *U-VELOCITY* RELATIVI AL SENSORE POSTO IN (1.80, 0.40, 0.28), QUINDI VICINO ALLA CAPPA 95
FIGURA 34 – PROFILI DELL'INQUINANTE ASPIRATO DALLA CAPPA PER SIMULAZIONI CON DIVERSO PASSO DI GRIGLIA 97
FIGURA 35 - ANDAMENTI NEL PUNTO (1.20, 0.78, 0.24). "TOTAL" INDICA LA SIMULAZIONE DI TUTTO IL DOMINIO, "MIRROR" DELLA SUA METÀ 100
FIGURA 36 - ANDAMENTI NEL PUNTO (0.26, 0.10, 0.28) "TOTAL" INDICA LA SIMULAZIONE DI TUTTO IL DOMINIO, "MIRROR" DELLA SUA METÀ. IN NUMERO DOPO IL NOME DEL CASO INDICA IL PASSO DI GRIGLIA UTILIZZATO 101
FIGURA 37 - CONFRONTO TRA CASO SIMULATO PER INTERO E SFRUTTANDO LA SIMMETRIA, CON PASSO DI GRIGLIA PARI A 2[CM] 102
FIGURA 38 – CONFRONTO TRA CASO SIMULATO PER INTERO E SFRUTTANDO LA SIMMETRIA, CON PASSO DI GRIGLIA PARI A 4[CM] 103
FIGURA 39 - CONFRONTO TRA CASO SIMULATO PER INTERO E SFRUTTANDO LA SIMMETRIA, CON PASSO DI GRIGLIA PARI A 1[CM] 103
FIGURA 40 – RAPPRESENTAZIONE DELLA PARTE DI DOMINIO SIMULATA. IL DOMINIO È SUDDIVISO IN QUATTRO MESH, LA MESH 1 HA CELLE DA 2 [CM], MENTRE LE ALTRE 3 HANNO CELLE DA 4 [CM] 107
FIGURA 41– CONFRONTO DELL'EFFICIENZA DI CATTURA TRA I DATI SPERIMENTALI E QUELLI OTTENUTI TRAMITE FDS 108
FIGURA 42 – EFFICIENZA DI CATTURA SPERIMENTALE A CONFRONTO CON QUELLA CALCOLATA TRAMITE FDS PER DIVERSE DIMENSIONI DI CELLA 109
FIGURA 43 – RESIDUI DI TRE CASI ANALOGHI MA CON PASSO DI GRIGLIA DIFFERENTE 110
FIGURA 44 – CONFRONTO EFFICIENZE DI CATTURA AL VARIARE DELLA VELOCITÀ DEL GETTO DI SPINTA PER LE VARIE SERIE DI SIMULAZIONI 111
FIGURA 45 – IMPOSTAZIONE DELLA GRIGLIA DI CALCOLO VALIDA PER TUTTE LE SIMULAZIONI 114
FIGURA 46 – CONDIZIONI IDEALI TRA MESH DIVERSE 115
FIGURA 47 – ALLINEAMENTO DELLE MESH NON CONSENTITO DA FDS 116
FIGURA 48 - SEZIONE DELLA VASCA IN CUI VIENE EVIDENZIATO L'ANDAMENTO DALLA COMPONENTE DELLA VELOCITÀ DIRETTA COME IL GETTO DI SPINTA PER IL CASO H050W400D075. 123
FIGURA 49 – SEQUENZA DI 2 IMMAGINI RIGUARDANTI UNA SEZIONE DEL CASO H050W400D075 IN CUI VIENE EVIDENZIATO IL TRACCIANTE. LA ZONA SOTTOLINEATA IN NERO È IL TRACCIANTE A CONCENTRAZIONI BASSE, COME INDICATO IN LEGENDA, CHE SI SPARGE MOLTO PRIMA DI ESSERE ASPIRATO ED ESTRATTO DAL DOMINIO 125
FIGURA 50 – CONFRONTO DELL'INFLUENZA DELLA LARGHEZZA DELL'OSTACOLO CON E SENZA CORRENTI DI DISTURBO NELL'AMBIENTE DI LAVORO 126
FIGURA 51 – LA SLICE EVIDENZIA, IN NERO, IL TRACCIANTE CHE SFUGGE AL SISTEMA DI VENTILAZIONE NEL CASO H075W400D075V. LA PARETE VERDE ACQUA È LA SUPERFICIE DALLA QUALE VIENE IMMESSA LA CORRENTE D'ARIA DI DISTURBO. 128
FIGURA 52 - CONFRONTO DELL'INFLUENZA DELL'ALTEZZA DELL'OSTACOLO CON E SENZA CORRENTI DI DISTURBO NELL'AMBIENTE DI LAVORO. 128

FIGURA 53 – SEZIONE IN CUI SI EVIDENZIA IL TRACCIANTE, RELATIVA AL CASO H025W400D075 CON GETTO DI SPINTA SPENTO. LA SEQUENZA RAPPRESENTA 4 ISTANTI DI TEMPO DISTANZIATI DA UN SECONDO CIASCUNO. SI NOTA COSÌ IL PERCORSO DELL'INQUINANTE. 129
FIGURA 54 - CONFRONTO DELL'INFLUENZA DELL'ALTEZZA DELL'OSTACOLO CON LA PORTATA D'ASPIRAZIONE CALCOLATA SECONDO LE LINEE GUIDA ACGIH E RIDOTTA DEL 30%..... 131
FIGURA 55 - CONFRONTO DELL'INFLUENZA DELLA LARGHEZZA DELL'OSTACOLO CON LA PORTATA D'ASPIRAZIONE CALCOLATA SECONDO LE LINEE GUIDA ACGIH E RIDOTTA DEL 30%. 132

Elenco delle tabelle

TABELLA 1 – VELOCITÀ DI CATTURA RACCOMANDATE 39
TABELLA 2 – EFFICIENZA DI CATTURA AL VARIARE DELLA VELOCITA DELLA CORRENTE D'ARIA PER DIVERSE ALTEZZE DEL BORDO 41
TABELLA 3 – CARATTERISTICHE DELLA PROVA SPERIMENTALE CONSIDERATA 81
TABELLA 4 - DATI RICAVATI DALLA CURVA ALTA DI FIGURA 26 82
TABELLA 5 - VELOCITÀ DELLA LAMA D'ARIA SIMULATA 86
TABELLA 6 – CONFRONTO TRA CASI CON LA VASCA LUNGA 1.80 [M] E CON LA VASCA ACCORCIATA A 1.68 [M], DENOMINATI "CASO-12" 99
TABELLA 7 – CONFRONTO DI DIMENSIONI TRA LA MESH "VECCHIA" E QUELLA "ESTESA" 106
TABELLA 8 – CASI SIMULATI 119
TABELLA 9 – CASI ANALIZZATI CON PARAMETRI GESTIBILI 120
TABELLA 10 – INFLUENZA DELLA LARGHEZZA DELL'OSTACOLO 122
TABELLA 11 – INFLUENZA DELL'ALTEZZA DELL'OSTACOLO 123
TABELLA 12 – INFLUENZA DELLA LARGHEZZA DELL'OSTACOLO IN PRESENZA DI UNA CORRENTE DI DISTURBO PARI A 0.25 [M/S] 126
TABELLA 13 – INFLUENZA DELL'ALTEZZA DELL'OSTACOLO IN PRESENZA DI UNA CORRENTE DI DISTURBO PARI A 0.25 [M/S] 127
TABELLA 14 – RIDUZIONE DEL 30% DELLA PORTATA DI ASPIRAZIONE 130
TABELLA 15 – INFLUENZA DELLA POSIZIONE DELL'OSTACOLO 133

Introduzione

Nell'industria di processo vengono ampiamenti adoperati impianti di ventilazione, con lo scopo di controllare e limitare la concentrazione in ambiente delle sostanze tossiche, emesse durante processi di lavorazione, al fine di salvaguardare la salute dei lavoratori, che possono essere esposti a queste emissioni.

La ventilazione locale risulta dunque fondamentale per poter catturare gli inquinanti prima che si diffondano per tutto l'ambiente lavorativo. Questa viene realizzata tramite cappe di aspirazione poste in prossimità della zona di emissione degli inquinanti. Il solo utilizzo della ventilazione globale, intesa come l'introduzione nel locale di una certa quantità di aria fresca, non è infatti adatta a riportare le concentrazioni ambientali delle sostanze chimiche aerodisperse al di sotto dei valori limiti di soglia (*Threshold Limit Value o* TLV) in tutte le zone dell'ambiente industriale.

Nei processi nei quali vengono adoperate ampie vasche con superfici aperte, ad esempio nei trattamenti superficiali come la cromatura la, nichelatura, la zincatura e i trattamenti galvanici, i quali consistono in appositi bagni nei quali vengono immersi gli oggetti da trattare per fare acquisire loro nuove proprietà chimico-fisiche, una semplice cappa di aspirazione non può essere utilizzata. Infatti è necessario che al di sopra della superficie della vasca sia presente un'ampia regione libera da ingombri, per permettere sia ai lavoratori, che ai macchinari di accedervi. In tutti questi casi viene utilizzato il sistema di ventilazione *push-pull*, la cui peculiarità risiede nel suo funzionamento: degli ugelli (*push*), posti su un lato della vasca, spingono un getto d'aria sotto forma di una cortina, verso una cappa di aspirazione (*pull*), posta sul lato opposto, in modo tale da convogliare

al suo interno gli inquinanti. Il getto creato dal sistema di spinta intercetta l'inquinante e lo trasporta fin dentro la cappa aspirante fornendo così un controllo altrimenti difficile o impossibile.

Il grande vantaggio dell'utilizzo dei *push-pull* per queste lavorazioni, oltre alla possibilità di accedere alla vasca senza che vi sia l'ingombro di eventuali cappe di aspirazione che ne limiterebbero l'accesso, è l'elevata efficienza di rimozione degli inquinanti, peculiare di questi sistemi.

Per la corretta progettazione e dimensionamento di questo sistema di ventilazione è necessario compiere uno studio preliminare sul moto che il getto d'aria compie durante il suo percorso. Questo studio può essere affrontato in diversi modi: con serie di prove sperimentali, che richiedono però ingenti risorse economiche, con prove in laboratorio su scala ridotta, dalle quali possono però derivare problemi di *scale up*, oppure avvalendosi della fluidodinamica computazionale (*Computational Fluid Dynamics* o CFD), che rappresenta ormai uno strumento largamente impiegato per lo studio dei problemi di ventilazione e di dispersione d'inquinanti.

La CFD permette infatti di valutare il funzionamento di sistemi molto complessi senza dover ricorrere a prove sperimentali, riducendo notevolmente i costi e dando la possibilità di simulare fenomeni intrinsecamente pericolosi difficilmente riproducibili in condizioni di sicurezza. La fluidodinamica computazionale è sempre più utilizzata per tali pratiche, grazie all'aumento della potenza di calcolo disponibile e dello sviluppo di algoritmi numerici sempre più robusti ed affidabili.

In questo lavoro di tesi è stata affrontata la modellazione numerica di un sistema di ventilazione *push-pull*. Tale lavoro si concentra sull'analisi dell'efficienza di cattura dell'inquinante, da parte della cappa di aspirazione, in funzione delle dimensioni geometriche degli oggetti che possono essere posti nelle vasche durante le lavorazioni.

È stato inoltre studiato come questi ostacoli modifichino lo sviluppo del getto d'aria e la conseguente diffusione e cattura dell'inquinante.

Tutte le simulazioni CFD sono state effettuate utilizzando FDS (*Fire Dynamic Simulator*), un codice di calcolo che risolve numericamente una forma semplificata delle equazioni di Navier-Stokes appropriata per le basse velocità (numero di *Mach* < 0.3).

Queste equazioni vengono risolte mediante l'utilizzo dell'approccio LES (*Large Eddy Simulation*), particolarmente indicato per la modellazione turbolenta di flussi reattivi governati dalle forze di galleggiamento. Nonostante questo programma sia principalmente utilizzato per descrivere fenomeni di incendio, come ad esempio gli incendi da pozza, dopo un'ampia fase preliminare di convalida, è stato ritenuto adatto a modellare anche il sistema di aspirazione *push-pull*. É stato inoltre utilizzato il programma Smokeview, il quale permette la visualizzazione tridimensionale della caso simulato.

Il lavoro svolto si articola in quattro capitoli, il primo illustra lo stato dell'arte dei sistemi *push-pull* mentre il secondo descrive i materiali e i metodi utilizzati. Il terzo capitolo presenta il caso studio analizzato per la convalida di FDS, le simulazioni effettuate e i risultati ottenuti, viene infatti riprodotto il sistema *push-pull*, presentato nell'articolo scritto da Marzal *et al* [4], e vengono confrontati i risultati ottenuti tramite FDS con quelli ricavati sperimentalmente. Il quarto capitolo presenta infine il vero e proprio caso di studio dal quale vengono tratte tutte le indicazioni riguardanti l'influenza degli ostacoli in sistemi di ventilazione *push-pull*.

CAPITOLO 1

Stato dell’arte

1.1 Introduzione

1.1.1 Ventilazione locale e globale

Nelle industrie di processo vengono utilizzati impianti di ventilazione per controllare e limitare l’esposizione dei lavoratori alle sostanze tossiche emesse durante i processi di lavorazione. A tal fine si possono sfruttare tecniche di ventilazione globali o locali.

Con ventilazione globale si intende l’introduzione nel locale di una certa quantità di aria fresca utile a ripristinare le condizioni di comfort e salubrità dell’ambiente. Questa tecnica non è però adatta per riportare la concentrazione delle sostanze tossiche al di sotto dei valori limite di esposizione (TLV) previsti dalle norme, perché sarebbero necessari volumi d’aria di ricambio notevoli. Questi comporterebbero forti correnti d’aria, che gioverebbero sì alla qualità dell’aria, ma che potrebbero anche creare problemi al personale.

Non è da trascurare nemmeno l’impatto che la sostituzione di aria viziata con aria pulita, introdotta dall’esterno, avrebbe sui costi. Si pensi, ad esempio, alla quantità di energia necessaria a scaldare l’aria esterna al fine di poterla introdurre nell’ambiente di lavoro, soprattutto d’inverno.

La ventilazione globale può quindi coadiuvare il controllo degli inquinanti, ma è utile soprattutto al mantenimento della buona qualità dell'aria, provvedendo al controllo di temperatura, umidità e odore.

La ventilazione locale è una strategia di controllo degli inquinanti che punta alla rimozione dei composti tossici laddove questi sono prodotti ed emessi, in modo tale da prevenirne l'espansione in tutto l'ambiente di lavoro.

La ventilazione locale viene realizzata a mezzo di cappe di aspirazione che, tramite la modifica del campo di moto nei pressi della zona di emissione dell'inquinante, lo catturano e ne facilitano l'asportazione. Quando la concentrazione dell'inquinante è molto bassa, come succede solitamente nei problemi di igiene industriale, gas, fumi e vapori non risultano soggetti ad effetti gravitazionali significativi, a meno che essi siano emessi a velocità o temperature elevate. Quindi, fatto salvo i casi di emissioni veloci o molto calde, ovvero lontane dalla temperatura dell'ambiente, gli inquinanti a basse concentrazioni non hanno alcuna tendenza a muoversi verso una direzione privilegiata. Proprio per questo motivo non vi sono regole utili alla collocazione della cappa, ma è fondamentale porla il più vicino possibile alla sorgente.

In questo modo è possibile controllare i tossici con buone prestazioni, con costi contenuti e sicuramente più bassi rispetto a quelli che si dovrebbero affrontare approcciando il problema con la ventilazione globale. Lo svantaggio principale di questa tecnica, oltre alla necessità di avere una cappa nei pressi di ogni sorgente di emissione, è la limitazione delle possibilità di accesso alla zona contaminata. Si consideri la situazione rappresentata in Figura 1: sebbene sia possibile intervenire nella zona di lavoro, si tratta certamente di una configurazione non adatta a preservare la salute della persona.

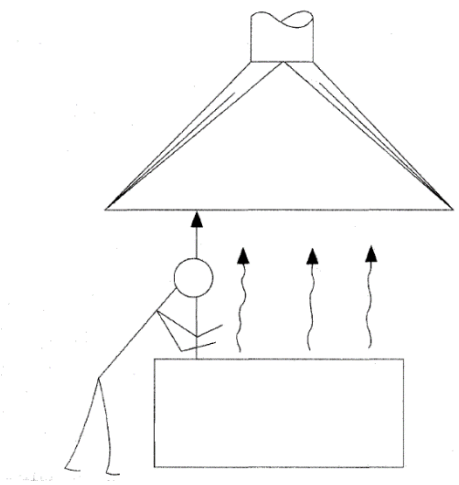


Figura 1 - Configurazione non adatta della cappa aspirante

Infatti, oltre i problemi ergonomici che potrebbero derivare a seconda dell'altezza della cappa, il lavoratore viene a trovarsi nella situazione più sfavorevole possibile, ossia con il viso posto sulla traiettoria dei tossici esalati.
Inoltre, se volessimo eseguire delle lavorazioni su oggetti particolarmente ingombranti, è evidente che un'eventuale cappa sovrastante, ad esempio, la superficie di una vasca di trattamento, renderebbe impossibile alcune operazioni chiave come l'inserimento e l'estrazione del pezzo. Proprio per applicazioni di questo tipo è stata introdotta la tecnica *push-pull*, che consente di ventilare adeguatamente una generica vasca di trattamento senza ingombri sopra di essa. Utilizzando un sistema *push-pull* rimane infatti libero, oltre ai due lati non occupati dal sistema di ventilazione, tutto lo spazio sopra la vasca.

1.1.2 Ventilazione *push-pull*

Il sistema di ventilazione *push-pull* è un particolare sistema di ventilazione locale, il cui scopo consiste nel convogliare le sostanze inquinanti verso l'aspirazione tramite getti di aria opportunamente progettati. Viene principalmente usato per la rimozione di sostanze dannose che si liberano dalla vasche aperte usate nei processi di placcatura, pulitura e durante i trattamenti superficiali. In questi processi gli oggetti da trattare vengono immersi nel liquido contenuto nelle vasche per poter far acquisire loro nuove proprietà.

Un esempio di questi trattamenti sono la cromatura, la nichelatura, la zincatura e i trattamenti galvanici.

Il sistema *push-pull* consta di due dispositivi: un ugello posto su un lato della vasca, che spinge un getto d'aria, e una cappa di aspirazione, posizionata sul lato opposto rispetto all'ugello, che riceve questo getto d'aria. Il getto creato dal sistema di spinta intercetta l'aria inquinata e la trasporta a distanze relativamente grandi fin dentro la cappa aspirante fornendo un controllo altrimenti difficile o impossibile. L'aria ambiente, nella quale sono presenti gli inquinanti, viene convogliata nel getto di spinta generando un flusso di aria complessivo di portata maggiore rispetto a quella in uscita dagli ugelli, indirizzata verso la cappa di aspirazione. La velocità di cattura generata dalla cappa aspirante, come vedremo, decade molto velocemente e questo rientra nella sua logica di funzionamento. Lo scopo primario della cappa di aspirazione è infatti quella di asportare l'aria proveniente dal getto nella quale si è raccolto l'inquinante, non quello di fornire un'elevata velocità di cattura.

Il sistema *push-pull* è molto efficiente quando il campo di velocità del getto d'aria è uniforme e il flusso d'aria tende ad aderire al piano di lavoro; al contrario presenta alcuni problemi nel caso siano presenti degli ostacoli, rappresentati dal materiale da trattare. Quest'ultimi non permettono al flusso d'aria di svilupparsi in maniera corretta, rompendo la cortina e deviando il flusso, per questi motivi l'inquinante può non essere raccolto e può dunque diffondersi nell'ambiente.

1.2 Principio di funzionamento

L'efficacia del sistema di ventilazione *push-pull* si basa sul principio che un getto d'aria, spinto attraverso una piccola apertura, mantiene il proprio effetto per una considerevole distanza. Può infatti arrivare fino ad una distanza pari a 30 diametri prima che la turbolenza e l'espansione ne riducano la velocità ad un valore minore del 10% del valore iniziale. Al contrario se la stessa portata di aria fosse aspirata dalla stessa apertura, il flusso d'aria diventerebbe per la maggior parte non direzionale e la sua regione di influenza sarebbe drasticamente ridotta: la velocità frontale si ridurrebbe infatti al 10% del valore iniziale in appena un diametro di distanza dall'apertura di aspirazione, come visibile in Figura 2. La velocità di cattura decresce infatti con l'inverso del quadrato della distanza dalla sezione di aspirazione. [1]

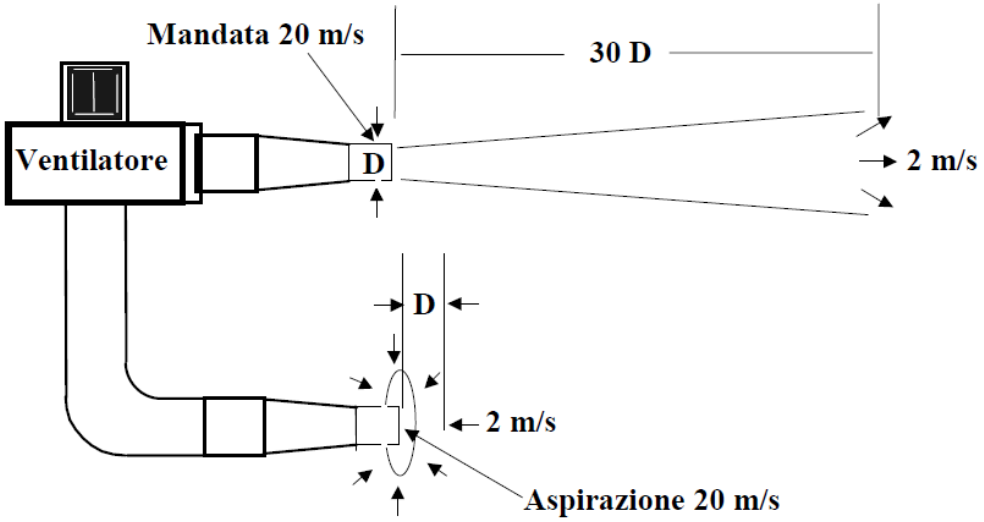


Figura 2 – Confronto tra getto e aspirazione

Il sistema di ventilazione *push-pull* viene utilizzato proprio in tutti quei processi nei quali una semplice aspirazione localizzata non sarebbe sufficiente a garantire la cattura delle sostanze inquinanti perché, per ragioni tecniche, la cappa non può essere posizionata nelle immediate vicinanze della superficie di emissione.

1.2.1 Cappa d'aspirazione

Risulta molto utile, in questa fase, approfondire il comportamento dell'aspirazione e il decadimento della sua velocità di cattura, soprattutto in vista delle simulazioni in cui si dovrà tenere conto della distanza di influenza della cappa, sia per decidere le dimensioni del dominio, che per posizionare l'ostacolo. Dovrà esservi infatti spazio a sufficienza perché il campo di moto generato dal dispositivo di aspirazione si sviluppi.

La cappa, come già accennato in precedenza, deve trovarsi in prossimità della sorgente di inquinante per essere efficace, a causa del rapido e inevitabile decadimento della velocità di cattura con la distanza dal dispositivo.

In Figura 3 sono rappresentati i profili di velocità alla fine di un condotto di aspirazione circolare, in funzione della distanza dallo stesso. Si nota che la velocità diminuisce molto velocemente fino a ridursi ad un decimo di quella iniziale alla distanza di un diametro dal punto di emissione. [2]

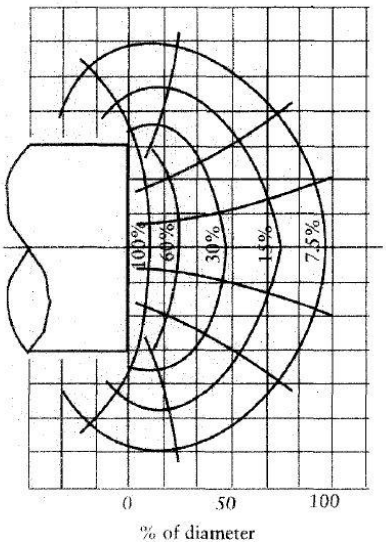


Figura 3 – Profili velocità di aspirazione di un condotto circolare

Si commette quindi un errore trascurabile considerando completamente esaurito l'effetto della velocità ad un diametro di distanza.

Per aiutare a convogliare l'aria inquinata verso la cappa, si ricorre sovente all'utilizzo di flange poste intorno all'apertura, in questo modo vengono limitati anche i possibili disturbi dovuti alla presenza di correnti d'aria di disturbo.

Nel caso di cappe flangiate la situazione migliora leggermente, come mostrato in Figura 4, infatti la velocità si esaurisce a distanze maggiori. Questo è dovuto alla restrizione del volume disponibile per l'aspirazione e all'imposizione, seppur parziale, di direzionalità al flusso, che può quindi allargare la sua zona di influenza quasi del 10%.

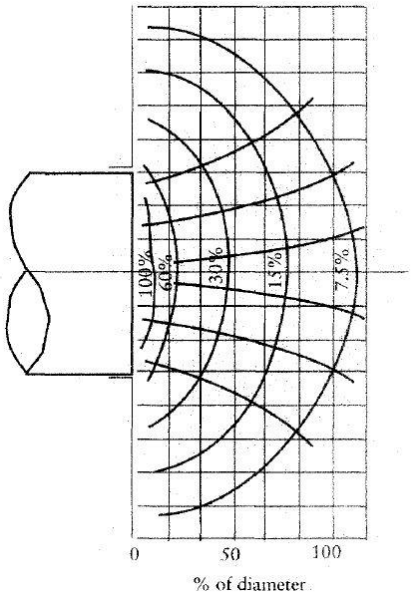


Figura 4 – Profili velocità di aspirazione di un condotto circolare flangiato

In letteratura tali profili sono disponibili anche per dispositivi non circolari, in particolare per cappe quadrate e rettangolari con diversi rapporti tra altezza e larghezza [2]. Interessante per i nostri scopi è il rapporto 1:10, abbastanza rappresentativo per quanto riguarda cappe di sistemi *push-pull*.

Per cappe di questo genere l'effetto dell'aspirazione si sente a distanze maggiori rispetto al caso di cappe circolari, come è ragionevole supporre, dal momento che viene persa meno energia per richiamare aria ai lati perché il flusso risulta diretto prevalentemente in una direzione precisa. Infatti, poiché la cappa è molto più sviluppata in larghezza che in

altezza, i profili di velocità risultano quasi piatti nella zona centrale, e questo favorisce una diminuzione della velocità più lenta.

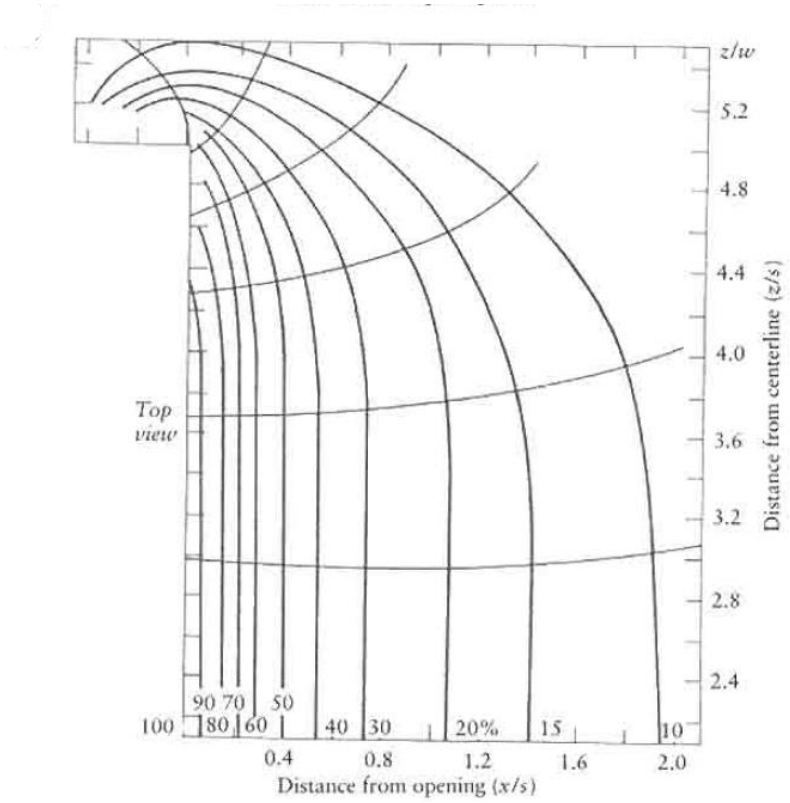


Figura 5 – Profili di velocità in funzione della distanza dall'apertura, x, e dell'altezza del dispositivo, s,

In Figura 5 è raffigurata la sezione orizzontale di una cappa con rapporti 1:10, i profili percentuali di velocità sono riportati in funzione della distanza *x*, a sua volta espressa in rapporto all'altezza del dispositivo *s*. Come accennato in precedenza, la zona di influenza della cappa non si estende più fino alla distanza di un diametro (o grandezza caratteristica, per cappe non circolari), come accadeva nel caso di condotti circolari, ma fino a distanze pari al doppio della grandezza caratteristica, *s*. Questo risultato permette di notare come semplici accorgimenti geometrici permettano di avere vantaggi non trascurabili.

1.3 Valutazione della portata da aspirare

Fondamentale nei sistemi *push-pull* è la valutazione della portata da aspirare, che è data dalla somma di tre componenti. Alla portata del getto di spinta si uniscono infatti sia l'aria ambiente, richiamata dai bordi del getto, che l'inquinante, quest'ultimo però risulta essere in quantità trascurabile rispetto alle altre portate in gioco. Una stima della portata da rimuovere può essere fatta attraverso l'equazione (1), che rappresenta il rapporto tra la portata del getto a una certa distanza dall'ugello e la portata iniziale.

$$\frac{Q_x}{Q_0} = 1.2\sqrt{\left[\frac{(ax)}{b_0} + 0.41\right]} \qquad (1)$$

Il rapporto tra le velocità sull'asse del getto può essere invece calcolato come:

$$\frac{V_x}{V_0} = \frac{1.22}{\sqrt{\frac{ax}{b_0} + 0.41}} \qquad (2)$$

in cui:

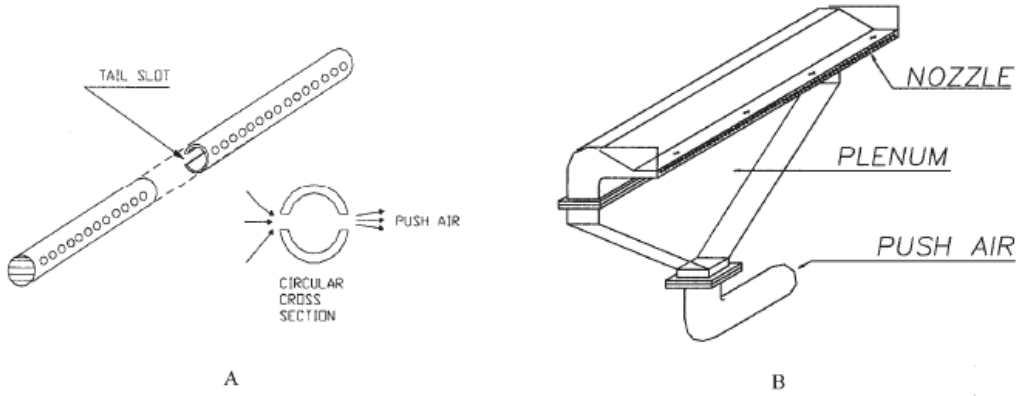
- Q_0 è la portata del getto immessa dagli ugelli [m^3/s]
- Q_x è la portata del getto ad una distanza x dagli ugelli [m^3/s]
- V_0 è la velocità di uscita dagli ugelli [m/s]
- V_x è la velocità massima del getto alla distanza x dagli ugelli [m/s]
- a è un fattore caratteristico dell'ugello che vale 0.13 per fessure e tubazioni
- x è la distanza dall'ugello [m]

Quando l'ugello è sospeso liberamente (getto libero piano) b_0 è uguale alla metà della larghezza totale dell'apertura, quando è posto sopra o molto vicino ad una superficie piana (getto a parete) b_0 è uguale alla intera larghezza dell'apertura, mentre per tubazioni con fori b_0 è la larghezza di una fessura di area equivalente. [1] [3]

1.4 Dimensionamento dispositivo di spinta

L'ugello può essere costituito da una lunga fessura sottile, da un tubo forato o da ugelli singoli, necessari a direzionare il getto verso l'area di emissione dell'inquinante. La superficie totale di uscita non deve eccedere il 50% della sezione trasversale del *plenum*, in modo tale da garantire uniformità nella distribuzione dell'aria.

La configurazione più utilizzata è costituita da un semplice tubo forato, come quello mostrato in Figura 6 chiuso ad una estremità.



(A) Perforated tube used in the push system. (B) Plenum chamber to which the perforated tube is attached (nozzle).

Figura 6 – (A) Tubo forato usato nell'elemento di spinta. (B) Plenum al quale è attaccato il tubo forato

Questa configurazione viene preferita rispetto ad uno *slot* costituito da una lunga fessura continua, poiché quest'ultima non produce un getto di emissione uniforme.

Risulta però necessario, al fine di ottenere una distribuzione uniforme, bilanciare sia la perdita di carico lungo il distributore, dovuta all'attrito, che la caduta di pressione attraverso gli orifizi.

Il collettore degli ugelli può avere una sezione trasversale rotonda, rettangolare o quadrata, in tutti questi casi è però necessario che sia posto il più vicino possibile al bordo della vasca in modo da minimizzare l'altezza libera sopra la superficie del liquido, così

che il getto risulti aderente a quest'ultima, acquisendo le caratteristiche di un getto a parete.

Nella pratica è richiesto che il dispositivo inietti l'aria a partire da una distanza di 13-25 [mm] dal bordo vasca e che la superficie del liquido non superi i 20 [cm] sotto il bordo del recipiente. Risulta dunque essenziale che fra il collettore e il recipiente non vi siano spazi liberi.

L'asse del collettore deve essere inoltre regolabile, fino ad un massimo di 20°, in modo tale da poter ottimizzare l'angolo del getto, permettendogli di evitare possibili ostruzioni e di mantenere il getto a livello della superficie della vasca. [1]

1.4.1 Perdite di carico

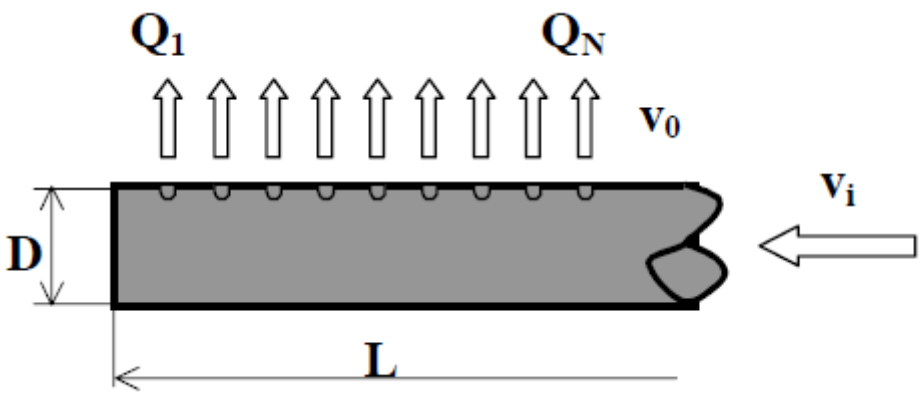


Figura 7 – Configurazione del distributore

La perdita di carico in un generico distributore come quello in Figura 7, considerando sia un regime di moto turbolento, tipico delle ventilazioni industriali, che un fattore d'attrito uniforme, è ricavabile dalla seguente equazione:

$$\Delta p = \left(\frac{4fL}{3D} - 2k'\right)\rho\frac{v_i^2}{2} \qquad (3)$$

In cui:

- Δp rappresenta la perdita di carico nel distributore [Pa]

- L è la lunghezza del distributore [m]
- D è il diametro del distributore [m]
- f è il fattore di attrito
- v_i è la velocità dell'aria in ingresso del distributore [m/s]
- k' è un parametro che assume un valore compreso tra 0.5 e 1.

La portata deve essere mantenuta uniforme tra i fori, per questo motivo è necessario che la perdita di carico attraverso essi prevalga rispetto a quella lungo il condotto, in questo modo il salto di pressione a cavallo dei fori non differisce in maniera influente tra il primo e l'ultimo, garantendo così una portata costante.

Nel caso in cui l'area di ciascun orifizio sia molto inferiore rispetto alla sezione del condotto, situazione auspicabile e quasi sempre verificata, la perdita di carico attraverso un singolo foro può essere calcolata come:

$$\Delta p_0 = \frac{1}{c_0^2}\frac{\rho v_0^2}{2} \qquad (4)$$

In cui:

- c_0 assume il valore di 0.62 per tutti gli orifizi.
- ρ è la densità, in [kg/m^3]
- v_0 è la velocità attraverso il singolo foro, misurata in [m/s]

La portata attraverso un orifizio è proporzionale alle velocità di scarico e, come si deduce dall'equazione (5), alla radice quadrata delle perdite di carico attraverso l'orifizio. Ne consegue che quando la portata attraverso gli orifizi è di poco variabile, la percentuale di maldistribuzione del flusso d'aria, definita come la variazione percentuale della portata tra il primo e l'ultimo orifizio, può essere stimata come:

$$\frac{Q_1 - Q_N}{Q_1} = 1 - \frac{Q_N}{Q_1} = \left(1 - \sqrt{\frac{\Delta p_0 - |\Delta p|}{\Delta p_0}}\right) \qquad (5)$$

In cui:

- Q_1 è la portata in uscita dal primo foro
- Q_N è la portata in uscita dall'n-esimo foro

Consideriamo ora un collettore di scarico avente una maldistribuzione del flusso d'aria pari al 5%, nel quale possano essere trascurate le perdite di carico nel tubo 4fL/3D << 1 (condizione spesso verificata nelle condizioni reali). Fissato il parametro k' pari a 0.5, è possibile dimostrare come la variazione di pressione attraverso gli orifizi risulta pari a 10 volte la perdita di carico attraverso il tubo.

Sotto queste ipotesi e utilizzando la relazione precedente tra le perdite di carico e la velocità (3), si ricava l'equazione (6):

$$1 - \sqrt{1 - \frac{\rho v_i^2/2}{(\rho v_0^2/2)/c_0^2}} = 0.05 \quad \rightarrow \quad \frac{v_0}{v_i} = \frac{A_p}{A_0} = \sqrt{10} c_0 \approx 2 \qquad (6)$$

In cui:

- A_p rappresenta l'area trasversale del distributore [m^2]
- A_0 la somma delle aree degli orifizi [m^2]
- v_i è la velocità nel distributore, sempre in [m/s]

Questa relazione è conforme alla norma di buona tecnica, la quale prevede che la velocità nel *plenum* (o nel condotto) sia la metà di quella nelle fessure (o negli orifizi).

Per realizzare una buona distribuzione non è necessario ottenere alte cadute di pressione con alti valori di portata, infatti se la distribuzione risulta uniforme e gli effetti di attrito lungo la tubazione sono trascurabili, un diminuzione della portata comporta una riduzione di Δp e Δp_0 nella stessa proporzione. Dunque la variazione di portata non influisce sulla distribuzione, mente se la distribuzione non fosse uniforme, un aumento di portata comporterebbe miglioramenti. [1]

1.4.2 Inclinazione dei fori

Nell'approcciarsi al dimensionamento di un sistema di ventilazione *push-pull* per prima cosa è necessario decidere quale tipo di ugello verrà utilizzato per il getto di spinta. Nel caso si scelga un tubo forato i risultati migliori si ottengono quando i fori sono inclinati di un angolo compreso tra i 22° e i 45° rispetto alla superficie liquida e quando questi sono in numero elevato.

Il diametro dei fori non ha invece grande influenza sull'efficienza del sistema di ventilazione.

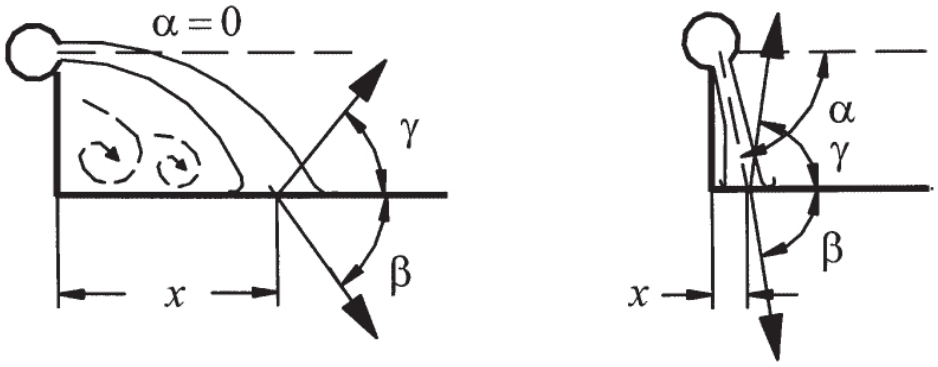


Figura 8 – Flusso di aria in uscita dal push

Nella Figura 8 sono rappresentate le due situazioni limite di inclinazione dei fori, spingendosi oltre le quali la corrente di rimbalzo, che si crea dall'impatto sulla superficie, va ad inficiare la buona riuscita della ventilazione.

Detto che non ha alcun senso avere un getto di spinta che immette l'aria verso l'alto, e quindi con angolo inferiore a zero gradi, non conviene nemmeno superare i 45°. Potrebbe infatti sembrare conveniente avere una forte inclinazione dell'ugello, in modo tale che la distanza d'impatto (x) del getto sia minima. Così facendo infatti verrebbe ridotta al minimo la zona di ricircolo al di sotto del getto, questa condizione produrrebbe però uno sfavorevole incremento dell'angolo d'impatto β al quale corrisponde una corrente di rimbalzo maggiore, come si vede nell'immagine a destra di figura 8. Tale corrente di rimbalzo andrebbe poi a destabilizzare il getto che, invece di uniformarsi in un'unica cortina, darebbe origine ad un caotico moto ondoso. [4]

1.4.3 Numero dei fori

Un numero minore di fori porta ad una maggiore quantità di moto del getto, aumentando in questo modo la violenza dell'impatto della corrente sulla superficie della vasca. Quando il numero di fori è basso l'efficienza totale diminuisce significativamente, al contrario, quando il numero è sufficientemente elevato, aumenta notevolmente. Questo accade perché l'elevato numero di fori favorisce la formazione di una cortina d'aira continua, che rappresenta, come già detto, la miglior condizione possibile.

Nelle Figura 9, Figura 10 e Figura 11 si nota proprio questo effetto.

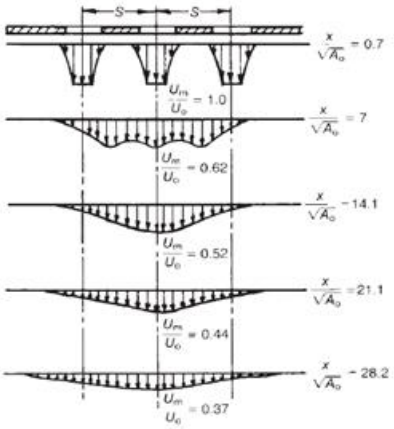


Figura 9 – Profili di velocità di tre getti circolari confluenti

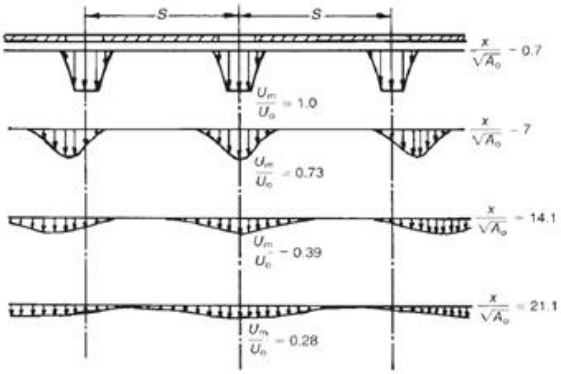


Figura 10 – Profili di velocità di tre getti circolari confluenti

Le Figura 9 e Figura 10 mostrano i profili di velocità dei getti d'aria uscenti da fori aventi diametro d=100[mm]. La distanza S tra i centri dei fori è, per la Figura 9, pari a S=2 diametri mentre per Figura 10 è S=4 diametri. Come si può vedere più i fori sono vicini tra loro, più i getti d'aria raggiungono la confluenza e l'uniformità ad una distanza minore dal punto di emissione [5]. Nelle immagini, si noti inolte che la distanza x è normalizzata sulla radice dell'area del singolo foro, A_0. Come osservato, è quindi preferibile che il tubo sia dotato un alto numero di fori.

La Figura 11 ha le stesse caratteristiche della Figura 9, mostra però il flusso d'aria generato da 5 fori. È immediato osservare che il getto risulti uniforme a distanze inferiori rispetto ai casi precedenti.

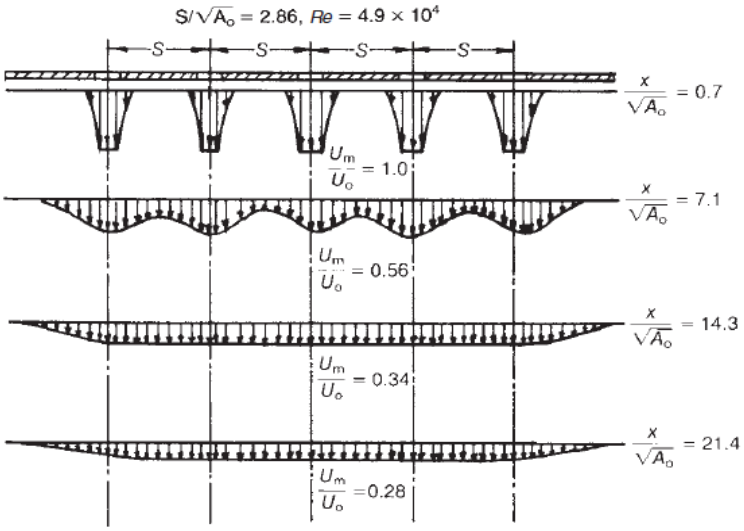


Figura 11– Profili di velocità di cinque getti circolari confluenti

Come già evidenziato, anche confrontando la Figura 9 e Figura 11 si nota quindi la convenienza nell'utilizzare un alto numero di fori. [5]

1.4.4 Campo di moto generato dal push

L'elemento di push non deve essere più alto della parete della vasca. Infatti, se così fosse, si creerebbe una zona libera attraverso la quale l'aria verrebbe integrata nella parte inferiore della cortina generata dal getto di spinta, aumentando quindi la distanza di impatto del getto stesso.

La Figura 12 rappresenta in maniera schematica il campo di moto della cortina d'aria generata dal sistema di spinta.

Appena sotto il flauto forato si forma una depressione nella quale si instaurano dei micro vortici che richiamo aria dalla cortina, deformando così il flusso che tende a schiacciarsi verso la superficie (zona 1). Dopo che la cortina impatta sulla superficie si crea una corrente di rimbalzo che distorce ulteriormente il flusso, quest'ultimo in parte sfugge via, mentre a valle si formano dei vortici (zona 2). Dopo questo primo rimbalzo il flusso tende però a stabilizzarsi aderendo alla superficie e richiamando aria esterna, aumentando così in maniera marcata la sua portata (zona 3). Infine il flusso di aria entra nella zona di influenza della cappa di aspirazione, che lo cattura (zona 4). [4] [6]

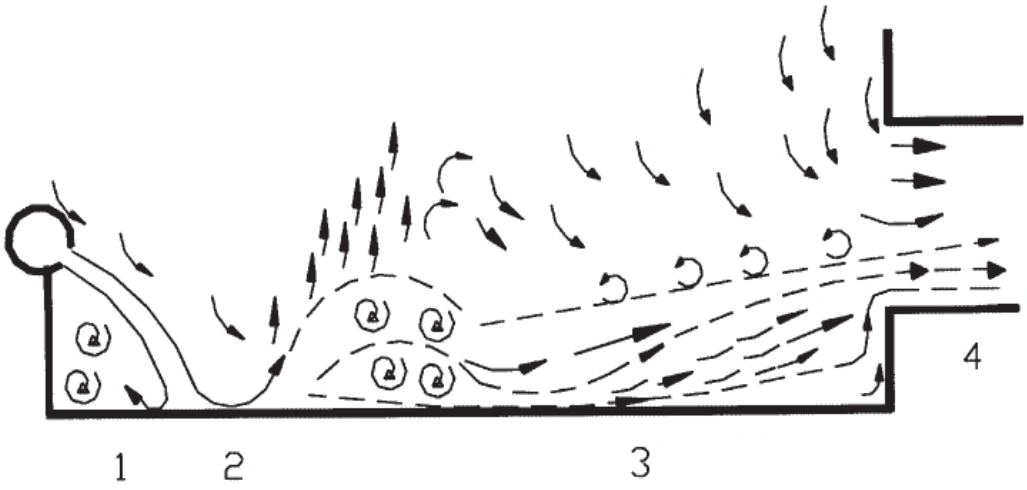


Figura 12 – Flussi di aria presenti in un sistema di ventilazione push-pull

Il comportamento del flusso di *push* e dell'inquinante può essere analizzato in maniera migliore utilizzando del fumo come gas tracciante e visualizzando la sua dispersione tramite una tecnica di rilevamento laser.

I parametri utilizzati sono:

- v_s è la velocità del flusso di spinta mediata sull'area all'uscita dell'ugello
- v_b è la velocità del flusso di aspirazione mediata sull'area di ingresso della cappa aspirante
- v_g è la velocità verticale del gas emesso dalla superficie mediata sull'area di quest'ultima

La Figura 13 evidenzia il flusso d'aspirazione mentre la Figura 14 quello dell'inquinante. In tutti i casi, presentati in figura 13 e 14, la velocità del gas e quella di aspirazione sono state mantenute costanti e pari a, rispettivamente, $v_g = 0.05$ [m/s] e $v_b = 0.3$ [m/s]. Quello che cambia è la velocità di *push* che aumenta progressivamente partendo dal caso (a) e arrivando al caso (d):

- $v_s^a = 1{,}55$ [m/s]
- $v_s^b = 2.79$ [m/s]
- $v_s^c = 3.49$ [m/s]
- $v_s^d = 4.17$ [m/s]

Il caso (a) rappresenta la situazione di dispersione: la velocità del *push* è troppo bassa, per questo motivo il flusso viene deviato verso l'alto dalla portata di inquinante che sale dalla vasca. L'influenza del *push* si nota solamente dopo metà vasca, ma solo una piccola parte del flusso di spinta e di inquinante vengono catturate.

Il caso (b) rappresenta la situazione di transizione, nella quale la velocità del *push* è maggiore del caso precedente, per questo motivo il flusso di spinta viene deviato con forza minore e riesce a raggiungere la zona di influenza dell'aspirazione in maniera più consistente. Nonostante ciò la velocità è ancora troppo bassa e gran parte dell'inquinante riesce a sfuggire al flusso del *pull*.

Il caso (c) rappresenta la situazione di incapsulamento: il flusso di *push* viene deviato con un angolo minore rispetto alla situazione di transizione perché la velocità del getto di spinta è maggiore. Il flusso di aria raggiunge in maniera ottimale la cappa di aspirazione e tutto l'inquinante viene catturato dal sistema di aspirazione. Tuttavia questa rappresenta una situazione limite poiché c'è il rischio che piccole modifiche nelle condizioni ambientali, come ad esempio la presenza di correnti di disturbo, potrebbero creare la dispersione del getto con la conseguente fuga di inquinante.

Il caso (d) rappresenta una situazione di forte aspirazione. La velocità di *push* è infatti così forte che devia il getto verso il basso per effetto Coanda. Tutte le particelle di inquinante vengono isolate al di sotto del getto di spinta e portate verso l'aspirazione. Il rischio di dispersione di inquinante risulta molto basso anche in caso di correnti ambientali. Questa situazione rappresenta dunque le condizioni di ottimo utilizzo del sistema di ventilazione *push-pull*. [7]

L'effetto Coanda, nominato in precedenza, è tipico dei getti di fluido scaricati vicino ad un una superficie solida. Nel caso di getti d'aria la presenza della superficie riduce l'*entrainment* di aria esterna proveniente da questo lato del getto, producendo una differenza di pressione attraverso il getto che tende a farlo curvare verso la superficie. Questa curvatura aumenta fino a far aderire il getto alla superficie [2].

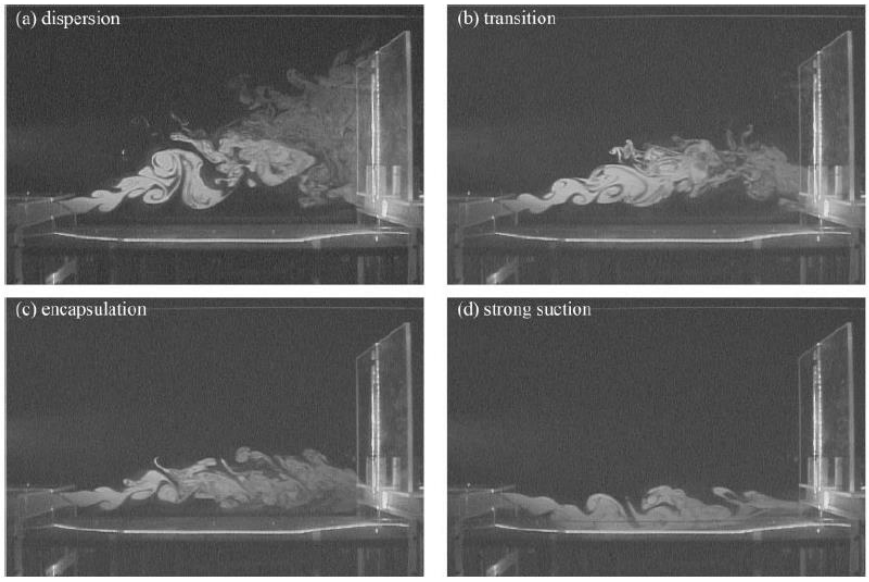


Figura 13 – Foto che evidenziano quattro diverse condizioni di aspirazione, ottenute tramite l'accoppiamento di fumo come gas tracciante, in uscita dall'elemento di spinta, e di una tecnica di rilevamento laser

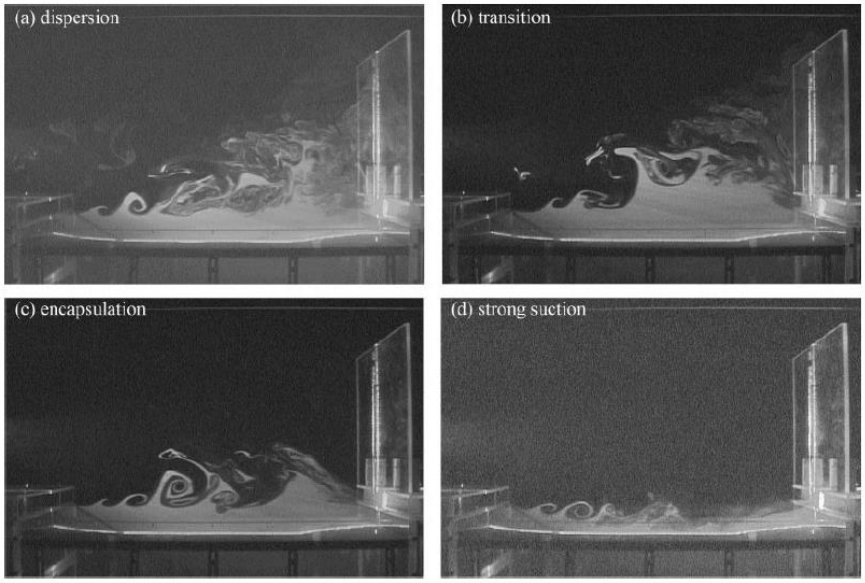


Figura 14 - Foto che evidenziano quattro diverse condizioni di aspirazione, ottenute tramite l'accoppiamento di fumo come gas tracciante, in uscita dalla superficie della vasca, e di una tecnica di rilevamento laser

1.4.5 Inerzia del getto

Dopo aver scelto il tipo di ugello è necessario concentrarsi sull'inerzia del getto, chiamata anche momento cinetico, che è pari al rapporto tra la velocità in uscita dal getto e la portata volumetrica specifica del getto ($Q_j * V_0$). Il momento cinetico deve essere sufficiente a trasportare il contaminante fino alla cappa di aspirazione, ma non così elevato da farlo disperdere nell'ambiente circostante.

In teoria il momento rimane essenzialmente costante lungo tutta la lunghezza del getto. La selezione della portata iniziale del getto e della velocità per raggiungere il valore del momento necessario al controllo, non sono valori arbitrari, ma sono in funzione della distanza dal push.

L'*American Conference of Governmental Industrial Hygienists* (ACGIH) suggerisce che il momento del getto per unità di larghezza della vasca presso l'ugello debba essere costante e pari a 0.46 [m^4/s^2] per un ambiente senza correnti di disturbo. Se invece fossero presenti correnti trasversali di velocità superiore agli 0.4 [m/s], o *vessel* larghi più di 3 [m], l'unica indicazione fornita è che la portata di spinta deve essere aumentata del 20%.

Per calcolare la portata e la velocità si possono utilizzare le correlazioni semi-empiriche (7) *e* (8), anch'esse fornite dall'ACGIH:

$$Q_j = 0.6819 * \sqrt{A_j} \tag{7}$$

$$V_0 = \frac{Q_j}{A_j} = \frac{0.6819}{\sqrt{A_j}} \tag{8}$$

In cui

- A_j è l'area del getto
- Q_j è la portata in uscita dal getto

Così facendo si verifica la condizione auspicabile di quantità di moto compresa tra i valori di 0.4 e 0.6 [m^4/s^2]. [3]

Notiamo che quando la distanza tra immissione ed estrazione è inferiore a 3 metri, il dimensionamento del sistema di spinta non dipende da nessuna caratteristica geometrica della vasca. Infatti, ponendo un'elevata quantità di moto (dell'ordine di 0.5 [m^4/s^2] per unità di larghezza), l'andamento della velocità del getto non varia per tutti i sistemi dimensionati in questo modo.

Dalle formule appena viste si ricava la (9):

$$Q_j * V_0 = 0.6819 * \sqrt{A_j} * \frac{0.6819}{\sqrt{A_j}} = 0.465\ [m^4/s^2] \qquad (9)$$

1.5 Dimensionamento della cappa aspirante

L'obbiettivo primario della cappa è quello di ricevere e rimuovere la portata di aria ricca di contaminanti che viene spinta dai getti, tuttavia nei casi in cui determinate situazioni creino la deviazione del flusso di aria di spinta, come ad esempio la presenza di ostacoli sulla superficie della vasca, oppure siano presenti composti molto volatili, risulta necessario aumentare la portata di aria aspirata dalla cappa. Quest'ultima deve essere larga quanto la vasca ed è necessario che sia collocata sul bordo della stessa, in modo tale che non si creino spazi vuoti tra vasca e cappa, attraverso i quali si potrebbero riscontrare delle fughe di inquinante.

La cappa di aspirazione può inoltre essere dotata di una flangia superiore in modo tale da prevenire correnti di aria provenienti da dietro.
Anche l'apertura della cappa deve essere dimensionata per assicurare uniformità della distribuzione dei flussi di aria nella bocca di aspirazione.
La portata volumetrica di aspirazione della cappa di estrazione per unità di larghezza (Q_e) è funzione dell'area superficiale della vasca (A_s) e della temperatura del liquido nella vasca secondo equazioni (10). [3]

$$\mathrm{T} < 65[°\mathrm{C}] \qquad \mathrm{Q_e} = 0.381 * \mathrm{A_s} \tag{10}$$

$$\mathrm{T} > 65[°\mathrm{C}] \qquad \mathrm{Q_e} = (0.00366 * \mathrm{T} + 0.1412) * \mathrm{A_s} \tag{11}$$

Le dimensioni della cappa di aspirazione devono essere tali da garantire una velocità di aspirazione di almeno 1 [m/s]. La velocità di cattura di una cappa aspirante è definita come la velocità dell'aria creata dalla cappa nel punto in cui il contaminante viene generato, essa deve essere sufficiente per superare le correnti di aria che si oppongono e portare così l'inquinante all'interno della cappa.
La portata di aspirazione deve essere imposta circa doppia rispetto alla portata del getto che raggiunge la cappa di aspirazione, in modo tale da evitare perdite dovute al fatto che parte dell'aria, proveniente dal *push*, non riesce ad essere aspirata e quindi sfugge. Inoltre è necessario prevedere che la velocità del getto alla faccia della cappa di aspirazione,

calcolata con l'equazione (2) per la velocità sull'asse del getto rispetto a quella iniziale, v_x, sia almeno di 0.75 - 1 [m/s]. Per valutare tale portata si può utilizzare l'equazione (1), già spiegata in precedenza e riportata solo per completezza:

$$\frac{Q_x}{Q_0} = 1.2 * \sqrt{\left[\frac{(a * x)}{b} + 0.41\right]}$$

Il flusso degli esausti aumenterà il movimento totale dell'aria, in maniera trascurabile lontano dalla cappa, ma in maniera significativa nei pressi di quest'ultima. Consideriamo solo il fatto che la cappa degli esausti deve rimuovere tutto il flusso di contaminanti nel getto. [8]

Questo può essere espresso come:

$$Q_A = SFQ_x(L) \qquad (12)$$

Dove:

- Q_Aè il volume del flusso in cappa per unità di larghezza della vasca
- SF rappresenta il fattore di sicurezza maggiore dell'unità
- $Q_x(L)$ è la portata del flusso di getto a distanza x=L

1.6 Linee guida ACGIH

L'ACGIH fornisce i criteri di buona tecnica per la progettazione di impianti *push-pull*, che sono concepiti per offrire un buon funzionamento, inteso come elevata efficienza di cattura, anche in casi sfavorevoli, come ad esempio in presenza di forti correnti d'aria laterali.

Questi criteri, basati sull'esperienza acquisita nel settore, suggeriscono spesso sovradimensionamenti, privilegiando quindi la sicurezza rispetto ai costi. Tali criteri, riassunti in Figura 15, sono validi per vasche larghe fino a 3 metri e in presenza di correnti d'aria di disturbo con velocità non superiori a 0.4 [m/s].

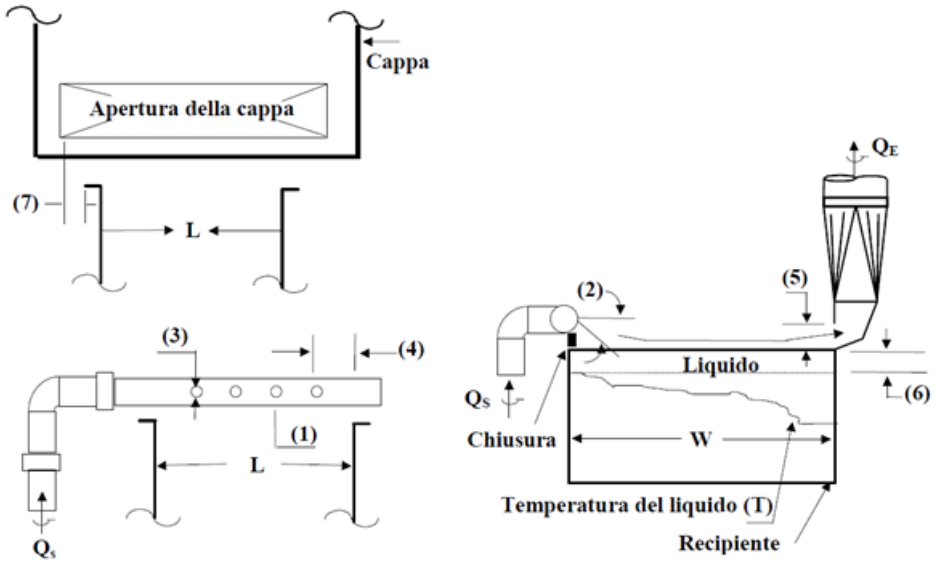


Figura 15 – Dati caratteristici per la progettazione di sistemi di aspirazione push-pull aventi larghezza massima 3 metri

- Collettore degli ugelli (1): circolare, rettangolare, o quadrato; l'area della sezione trasversale del collettore dovrebbe essere almeno 2.5 volte l'area totale degli ugelli.
- Angolo del getto (2): da 0° a 20° verso il basso.

- Altezza degli ugelli (3): 3-6 [mm] per la fessura o 4-6 [mm] di diametro per i fori con una distanza fra i fori di 3-8 diametri;
- I fori esterni o le estremità della fessura (4) devono essere posti a 13-25 [mm] all'interno dei bordi interni del recipiente.
- Apertura dell'aspirazione (5): la dimensione deve essere tale da permettere una velocità nella fessura di 10 [m/s]; i bordi esterni dell'apertura (7) devono estendersi fino al bordo esterno del recipiente.
- Superficie del liquido (6): la superficie del liquido non deve superare 20 [cm] sotto il bordo del recipiente con i pezzi da trattare all'interno della vasca.
- Portata di alimentazione degli ugelli: $Q_j = 2455\sqrt{A_j}$ [m^3/h] per [m] di lunghezza del collettore
- Aj = area degli ugelli [m^2] per m di lunghezza del collettore
- Portata totale: $Q_s = Q_j$ L [m^3/h]
- Portata di aspirazione: Q_e = 1350 [$m^3/h/m^2$] di superficie del recipiente per T ≤ 65 [°C]
- Q_e = 13.2 T + 509 [$m^3/h/m^2$] di superficie del recipiente per T > 65 [°C]
- Area della superficie del recipiente: L (lunghezza del recipiente) x W (larghezza)

L'ugello deve essere compreso tra i 3.2 [mm] e i 6.4 [mm], e quello che è chiamato il fattore momento del getto, ovvero il prodotto tra la sua velocità e la portata per unità di larghezza (U_iq_i) deve essere compreso tra i 0.39 e 0.59 [m^3s^{-2}].

L'ACGIH fornisce inoltre le linee guida per trovare la minima velocità di cattura, V_{cap}, che deve essere applicata per muovere il contaminante verso gli esausti. I valori raccomandati dipendono dal tipo di processo industriale e dalle condizioni del locale. La seguente Tabella 1 mostra le raccomandazioni tipiche per i processi che impiegano vasche con superfici aperte. [3]

Tabella 1 – Velocità di cattura raccomandate

Condizioni di dispersione del contaminante	Esempio	Velocità di cattura [m/s]
Rilasciato praticamente senza velocità nell'aria ferma	Evaporazione dalla vasca	0.25 – 0.5
Rilasciato a bassa velocità in aria moderatamente ferma	Placcatura, decapaggio	0.5 – 1.0

Il limite inferiore viene usato quando le correnti d'aria sono minime o favorevoli alla cattura, il contaminante è poco tossico, la vasca è usata solo con intermittenza e quando la cappa di aspirazione ha dimensioni importanti, (grossa quantità di aria in movimento). Il limite superiore viene usato quando le correnti d'aria sono significative o sfavorevoli alla cattura, il contaminante è molto tossico, la vasca è usata frequentemente e quando la cappa degli esausti è piccola (poca aria in movimento).

Risulta inoltre utile prevedere la regolazione sia della portata di spinta, del ± 20%, che di quella di aspirazione, fino ad un massimo pari al 20% [1].Questo viene fatto poiché l'eventuale presenza di correnti d'aria con velocità superiore a 0.4 [m/s] e di oggetti molto larghi e piatti immersi nella vasca, può richiedere un aumento delle portate di spinta e/o di aspirazione. Anche una larghezza della vasca superiore ai 3 metri richiede un aggiustamento delle portate. [1]

Dopo la realizzazione, l'efficacia del sistema *push-pull* deve essere verificata utilizzando traccianti di visualizzazione e apportando, se necessario, le idonee correzioni delle portate.

Dalle raccomandazioni ACGIH, sappiamo che il sistema sta operando in sicurezza se una velocità del fluido maggiore o uguale a quella di cattura viene indotta sull'intera superficie della vasca, e la portata di aspirazione è sufficiente a catturare tutto il fluido proveniente dal getto.

1.7 Estensione linee guida ACGIH

1.7.1 Influenza larghezza della vasca

Rota et al, [9] indagando l'efficienza del sistema di ventilazione in funzione della larghezza della vasca mantenendo inalterate tutte le condizioni viste in precedenza, hanno dimostrato che l'efficienza di cattura diminuisce in maniera evidente con l'aumentare della larghezza della vasca:

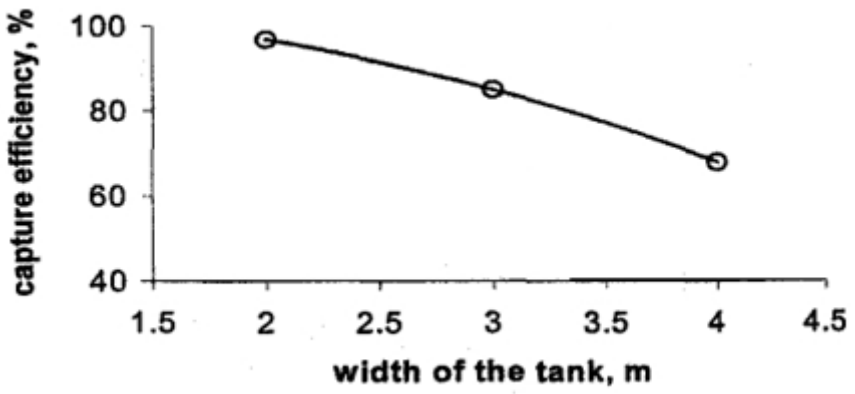


Figura 16 – Efficienza di cattura in funzione della larghezza della vasca

Dal grafico in Figura 16 è dunque chiaro che i criteri di progettazione ACGIH sono adeguati per vasche larghe fino a 3 [m], mentre per larghezze maggiori si ottengono efficienze di cattura troppo basse.

È possibile estendere le linee guida di design dell'ACGIH per vasche larghe tra i 2.5 e i 4 [m], semplicemente correggendo la portata del getto di spinta, lasciando tutti gli altri parametri inalterati: [9]

$$Q_j = Q_{jACGIH} * \left(\frac{W}{2.5}\right)^{\frac{3}{2}} \qquad (13)$$

Dove:

- Q_{jACGIH} è la portata che si ottiene dalle linee guida ACGIH
- W è la larghezza della vasca

1.7.2 Correnti d'aria di disturbo

1.7.2.1 Legame tra corrente d'aria e bordi della vasca

La ventilazione può essere disturbata da diversi fattori, tutti però riconducibili alla variazione del campo di moto dell'aria nella zona ventilata. Cambi di direzione dell'inquinante, dovuti magari a rotazioni o a movimenti della sorgente, e correnti d'aria sono quindi fattori da non trascurare perché incidono sulla fluidodinamica del sistema, e dunque sull'efficienza della ventilazione.

In uno studio sui trattamenti di superficie eseguito in laboratorio da *Braconnier et al*, [10] si è analizzata l'efficienza di cattura di una cappa di aspirazione, posta a margine di una vasca, al variare della velocità dell'aria di disturbo. Imponendo correnti d'aria perpendicolari alla cappa di aspirazione e con verso contrario al suo flusso, è stato segnalato 0.2 [m/s] come valore di velocità limite al di sotto del quale l'efficienza non risente in alcun modo dei suddetti flussi d'aria.

Per velocità superiori ai 0.2 [m/s] si nota una generale diminuzione dell'efficienza di cattura, ma l'effetto di tali correnti di disturbo appare anche fortemente legato all'altezza del bordo della vasca. Dai dati riportati in Tabella 2 è possibile vedere come l'efficienza, per correnti caratterizzate da velocità maggiori di 0.2 [m/s], diminuisca con l'altezza dei bordi della vasca.

Tabella 2 – Efficienza di cattura al variare della velocita della corrente d'aria per diverse altezze del bordo

Corrente d'aria [m/s]	Altezza bordo [m]	Efficienza [%]
< 0.20	0.30	100
	0.15	100
	0.10	100
0.55	0.30	90
	0.15	86
	0.10	67

1.7.2.2 Contrastare le correnti di disturbo

I criteri di progettazione ACGIH ipotizzano che le correnti d'aria, eventualmente presenti all'interno della stanza, siano contenute e caratterizzate da velocità inferiori a 0.3 [m/s]. Infatti nei luoghi di lavoro tali correnti assumono valori compresi tra 0.2 e 0.4 [m/s]. Tuttavia si nota che con una velocità di corrente pari a V=0.4 [m/s] l'efficienza di cattura scende all'80%, per diminuire ulteriormente nel caso di velocità maggiori, come si può vedere in Figura 17.

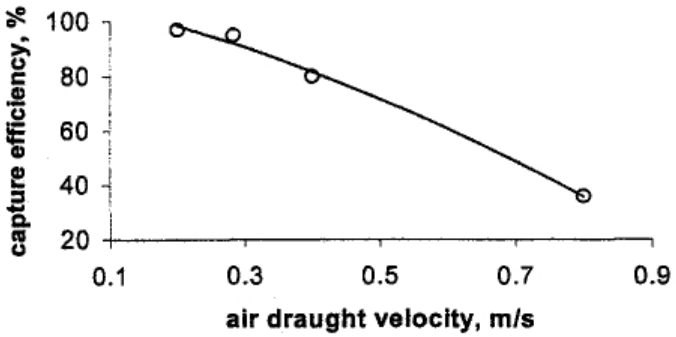


Figura 17 – Efficienza di cattura in funzione della velocita delle correnti d'aria di disturbo

Ciò mostra come il sistema di ventilazione sia sensibile alle correnti di disturbo, in particolar modo a quelle che soffiano nella direzione opposta rispetto al getto generato dal push, questo perché la corrente antagonista rompe il flusso che dal push arriva alla cappa di aspirazione.

In questi casi è necessario aumentare proporzionalmente la spinta del getto per mantenere inalterato il valore desiderato di efficienza di cattura. Considerando il caso più sfavorevole, quello in cui le correnti di disturbo sono dirette nella direzione opposta a quella del flusso del getto di spinta, per mantenere alta l'efficienza la portata del getto deve essere rivalutata mediante:

$$Q_j = Q_{jACGIH} * \left(\frac{V_d}{0.3}\right) \qquad (14)$$

Dove:

- V_d è la velocità della corrente d'aria sopra la superficie della vasca

- Q_{jACGIH} il valore della portata calcolato secondo le norme ACGIH.

Quando la corrente d'aria esterna soffia in direzione contraria rispetto a quella generata dalla ventilazione, si crea una competizione tra questi flussi, diminuendo l'efficienza di cattura. Questo risulta inoltre essere il caso peggiore a cui il sistema di ventilazione può andare incontro nel caso nell'ambiente fossero presenti delle correnti di disturbo. [9]

Nel caso si abbia una combinazione delle due situazioni precedenti, ossia una vasca larga tra 2.5 e 4 [m] e la presenza di correnti di disturbo con velocità maggiore o uguale a 0.3 [m/s], la portata del getto di spinta può essere adattata con una combinazione delle correzioni precedenti:

$$Q_j = Q_{jACGIH} * \left(\frac{V_d}{0.3}\right) * \left(\frac{W}{2.5}\right)^{\frac{3}{2}} \qquad (15)$$

1.7.3 Influenza del momento del getto

Le linee guida dell'ACGIH sembrano sovrastimare il momento del getto di spinta necessario, il quale risulta includere un fattore di sicurezza di 2 o 3.
Infatti com'è possibile vedere dalla Figura 18 ad una riduzione del 50% del momento del getto, non corrisponde un altrettanto marcata riduzione dell'efficienza, che rimane comunque al di sopra del 90%: [9]

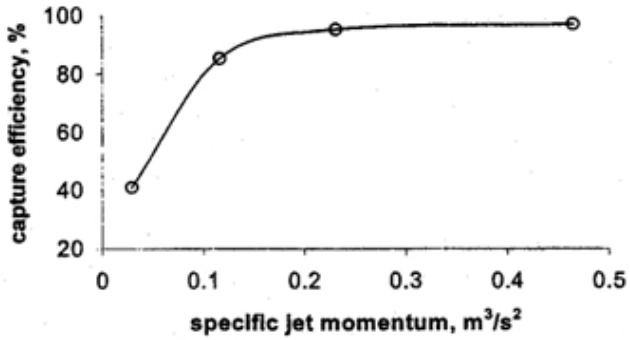


Figura 18 – Efficienza di cattura in funzione del momento specifico del getto proveniente dell'elemento di spinta

1.8 Influenza degli ostacoli

La presenza di ostruzioni lungo il percorso del getto deve essere evitata o almeno minimizzata, soprattutto nei pressi dell'ugello di spinta.
Questo perché ostruzioni dalla superficie piatta e larga rifletterebbero il getto d'aria, vanificando la ventilazione. Al contrario, destano molti meno problemi oggetti di piccola sezione trasversale, a maggior ragione se posti a ragionevole distanza dal dispositivo di spinta. Questo perché l'aria tenderebbe a scorrergli attorno, senza causare gravi perdite di inquinante.
Né nei manuali dell'ACGIH né in letteratura si trovano però delle trattazioni sistematiche per quanto riguarda l'effetto di eventuali ostacoli presenti in vasca sull'efficienza di cattura del sistema.

1.8.1 Effetto dell'ostacolo

Come si nota dalle sezioni in Figura 19, il campo di moto del getto di spinta è fortemente influenzato dalla presenza di un ostacolo.

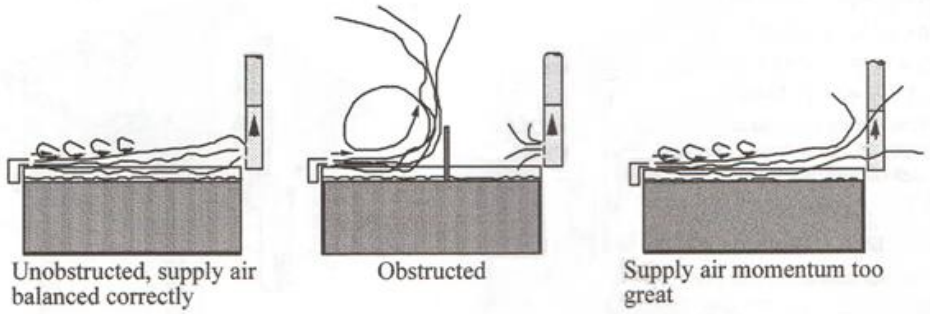


Figura 19 – Campi di moto di tre differenti casi di ventilazione push-pull

Senza ostruzioni il campo di velocità risulta infatti uniforme e il flusso d'aria tende ad aderire al piano di lavoro, eccetto per le regioni in prossimità del *push* e del *pull*. Quando invece si ha la presenza di un ostacolo il campo di velocità diventa caotico, e spesso non si riunisce con la cappa di aspirazione verso la quale è indirizzato. L'ostacolo inoltre, non

permettendo al flusso di svilupparsi liberamente, ne accelera il flusso in prossimità dell'ostruzione stessa [11]. Tale variazione della velocità si nota andando a confrontare i profili di velocità delle Figura 20 e Figura 21.

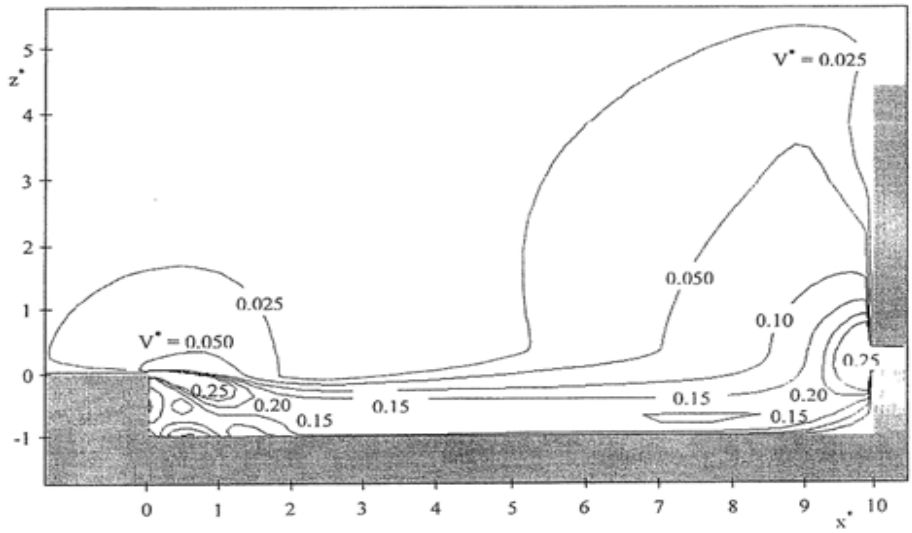


Figura 20 – Campo di velocità in assenza di ostacoli

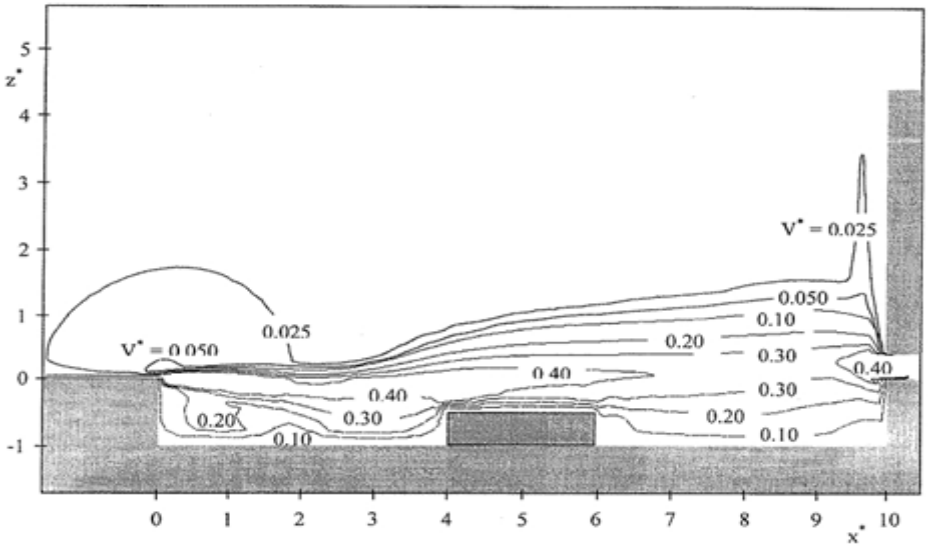


Figura 21 – Profili di velocità in presenza di un ostacolo

Dalle figure precedenti è inoltre possibile notare come, in presenza di un ostacolo cilindrico, si creino delle zone di ricircolo di aria nella zona compresa tra il *push* e l'ostacolo stesso. Quando non sono presenti il campo di velocità risulta uniforme e più

rilassato, soprattutto verso la fine della vasca. Infatti, le velocità minori favoriscono profili meno rigidi e più tondeggianti.

1.8.2 Geometria dell'ostacolo

In un precedente lavoro di tesi è stato simulato, tramite il software CFX, un sistema di ventilazione *push-pull* al fine di studiare l'influenza della geometria degli ostacoli sull'efficienza di cattura.

In tale lavoro, svolto da *Nasso e Bonanno* [12], si è preso un ostacolo a forma di parallelepipedo, con base aderente alla superficie della vasca, e lo si è posto lungo l'asse maggiore della vasca in modo tale che si interponesse ai dispositivi di spinta e cattura, disturbando così il campo di moto del getto d'aria.

Sono state effettuate diverse simulazioni, rispettando le linee guida dell'ACGIH, nelle quali è stata fatta variare sia la posizione, mantenuta sempre lungo l'asse maggiore della vasca in modo tale da poter sfruttare la simmetria, che le dimensioni del parallelepipedo, per poter indagare il contributo di questi diversi parametri nei confronti della variazione dell'efficienza di cattura.

1.8.3 Influenza della lunghezza

La lunghezza dell'ostacolo, ovvero il suo sviluppo lungo l'asse maggiore della vasca, non contribuisce all'abbassamento dell'efficienza di cattura, in quanto un aumento della lunghezza non influenza in maniera significativa il campo di moto del getto d'aria.

I campi di concentrazione dell'inquinante, con l'aumento dello sviluppo longitudinale dell'ostacolo, mostrano inoltre un maggiore "rilassamento" nella direzione di azione dei dispositivi di spinta e di cattura.

1.8.4 Influenza della larghezza

Un aumento della larghezza comporta una diminuzione dell'efficienza, poiché aumenta l'ingombro tra i dispositivi, i quali si "vedono" sempre meno. L'aria del getto di spinta, dovendo aggirare l'ostacolo, porta ad un incremento nella perdita di inquinante nella parte

laterale della vasca, si nota infatti una deviazione sempre più consistente del getto di spinta che non riesce più ad essere ripreso dall'aspirazione. È presente inoltre un effetto secondario, ovvero l'accumulo di inquinante dietro l'ostacolo, dovuto ai vortici di ricircolazione.

1.8.5 Influenza dell'altezza

L'aumento dell'altezza dell'ostacolo comporta una diminuzione dell'efficienza di cattura. Il getto di spinta che trasporta l'inquinante salta l'ostacolo, una parte viene catturata dall'aspirazione mentre una parte sfugge e viene portata verso l'alto. All'aumentare dell'altezza aumenta dunque la frazione d'aria del getto di spinta che viene persa, fino ad arrivare ad un valore limite di altezza oltre la quale rimane invariata, in questo modo anche l'efficienza di cattura non cambia.

1.8.6 Influenza della posizione

Sono stati evidenziati diversi andamenti spostando l'ostacolo dal push verso il pull. Quando l'altezza dell'ostacolo è minima si osserva un incremento dell'efficienza man mano che ci si allontana dal push, mentre per ostacoli sempre più grandi si verifica l'opposto.

Per ostacoli bassi la deviazione verso l'alto del getto di spinta è minima, dunque allontanando l'ostacolo dal push l'inquinante viene sollevato in misura minore perché il getto perde intensità con la distanza, permettendo in questo modo all'aspirazione di catturarlo più efficacemente.

Per gli ostacoli alti la deviazione del getto di spinta è invece più consistente; questo fatto comporta la generazione di una zona vorticosa che muove portate di aria e inquinante che aumentano spostando l'ostacolo dal *push* verso il *pull*.

È stato riscontrato inoltre che l'effetto di interruzione del campo di moto, dovuto alla presenza dell'ostacolo, è più sentito quando questo è vicino al dispositivo di spinta,

mentre l'azione di richiamo, dovuta alla deflessione del getto di spinta è meno efficiente allontanando l'ostacolo dal *push*.
Per questi motivi, avvicinando l'ostacolo al *pull*, si hanno maggiori portate di aria e inquinante che ricircolano verso l'uscita e un minore effetto di richiamo di separazione, giustificando così l'andamento decrescente dell'efficienza.
Infine per ostacoli molto alti l'efficienza di cattura è poco influenzata dalla loro posizione.

1.8.7 Revisione

Tutti questi risultati risultano però un po' datati e certamente meritano una revisione, anche visto l'aumento della potenza di calcolo di sponibile. Attualmente è infatti possibile analizzare l'influenza degli ostacoli utilizzando un numero di celle superiore di almeno un ordine di grandezza, il che permette di avere una grigliatura uniforme e molto più fitta, descrivendo quindi più accuratamente il dominio di calcolo.

Nel presente lavoro si utilizzeranno griglie di calcolo composte da qualche milione di celle, numero decisamente diverso riaspetto alle $130*10^3$ celle di *Nasso e Bonanno* [12].

Nel lavoro di *Nasso e Bonanno* [12] va anche notata la mancanza della convalida del *software* utilizzato per le simulazioni, che non permette di valutare l'attendibilità e l'acccuratezza dei risultati riportati.

CAPITOLO 2

Materiali e metodi

2.1 La fluidodinamica computazionale, CFD

La fluidodinamica computazionale è uno strumento ampiamente utilizzato per lo studio dei fenomeni di trasporto di calore, materia e quantità di moto che avvengono nei sistemi fisici, in presenza o meno di reazioni chimiche. In ambito ingegneristico lo scopo della CFD è quello di mettere a disposizione uno strumento di calcolo che permetta sia la progettazione di apparecchiature che la comprensione dei fenomeni che avvengono in esse.

La CFD riveste dunque un ruolo di grande importanza sia a livello accademico, come strumento di ricerca, che industriale. Lo sviluppo esponenziale della potenza di calcolo disponibile ha permesso l'espansione della CFD fino ad utenti privati, rendendo inoltre i calcoli sempre più affidabili e accurati. La sua applicabilità si è espansa anche grazie all'ottimizzazione dei tempi necessari ad effettuare le simulazioni, i quali rappresentano tutt'ora il limite più influente di questo strumento.
La CFD presenta numerosi vantaggi rispetto alla sperimentazione, sia su larga scala che di laboratorio. Essa permette infatti di simulare scenari che coinvolgono sia sistemi molto complessi, che fenomeni pericolosi come incendi, esplosioni e dispersioni di gas tossici, in maniera del tutto sicura. I codici CFD permettono dunque la generazione di enormi quantità

di dati a costi molto ridotti, soprattutto se confrontati con quelli necessari per sostenere prove sperimentali.
Sul mercato sono presenti svariati codici CFD, ognuno caratterizzato da diverse peculiarità, in funzione del sistema che propongono di studiare. La fluidodinamica computazionale può infatti trattare diversi problemi relativi ai flussi sia di natura transitoria che stazionaria, alcuni esempi delle sue applicazioni industriali sono:

- Impatto di alimentazioni d'aria o di dispositivi di scarico rispetto alle correnti d'aria presenti nei locali.
- Studio di pennacchi termici che si originano dai macchinari nei processi ad alte temperature.
- Effetto delle sorgenti di contaminanti e la loro propagazione all'interno dei locali.
- Studio dei flussi d'aria dovuto a parti in movimento.
- Distribuzione dei gas pesanti in casi di pericolo chimico.
- Distribuzioni e stratificazioni dei fumi generati da un incendio.
- Irraggiamento generato da un incendio.

A causa delle limitazioni della geometria, della fisica e della modellazione matematica, non tutti i risultati prodotti presentano un elevato grado di accuratezza, per questo motivo è consigliato, in fase preliminare, effettuare una convalida del codice CFD confrontando i risultati prodotti con quelli riscontabili in letteratura.

In alcuni casi i valori prodotti da un codice fluidodinamico possono essere ritenuti accurati fino ad uno scostamento del 10% rispetto ai valori reali, mentre in altre situazioni la precisione necessaria deve essere maggiore. Tutti questi valori possono comunque essere ritenuti efficaci e di aiuto per quanto riguarda un giudizio comparativo.

Per poter utilizzare un codice di calcolo fluidodinamico, essere in grado di giudicarne i limiti e saperne interpretare con senso critico i risultati, risulta dunque necessario avere conoscenze di meccanica dei fluidi, di chimica e di analisi numerica, ma soprattutto è necessario conoscere la struttura del *software* utilizzato.

Qualsiasi metodo CFD è composto da 3 parti principali:

- Preprocessamento (*preprocessing*)
- Risolutore (*solver*)
- Postprocessamento (*postprocessing*)

2.1.1 *Preprocessing*

Il *preprocessing* è la prima fase che compone il codice CFD, ed è costituita dalla definizione del dominio computazionale, delle proprietà dei fluidi e dei fenomeni chimici e fisici, dalle condizioni al contorno e infine dalla creazione della griglia di calcolo, chiamata *mesh*. In questa fase vengono definite tutte le informazioni di *input* e le operazioni che devono essere effettuate per trasformare quest'ultime in una forma che sia effettivamente utilizzabile dal risolutore.

La costruzione della griglia di calcolo è una delle operazioni più delicate in una simulazione fluidodinamica. Infatti le equazioni che descrivono il moto dei fluidi e l'intero fenomeno vengono discretizzate e risolte in un limitato numero di punti dello spazio, tali punti non sono altro che i nodi presenti all'interno della griglia di calcolo. Il numero di nodi determina dunque la precisione e l'accuratezza della simulazione, infatti più il passo di griglia è piccolo più i risultati sono accurati. È dunque importante che la *mesh* sia fine dove ci si aspetta che i gradienti siano maggiori, mentre può essere rilassata nelle zone dove la fluidodinamica è ben sviluppata e quindi non si hanno grandi variazioni delle diverse variabili. L'aumento del numero dei nodi implica però un aumento degli oneri computazionali, incrementando di conseguenza anche il tempo totale di calcolo. Risulta dunque necessario trovare il giusto compromesso tra accuratezza e affidabilità del risultato numerico e le risorse computazionali che si hanno a disposizione.

2.1.1.1 *Mesh*

Esistono varie tipologie di griglia di calcolo, ognuna caratterizzata da diverse peculiarità, la più usate sono:

- **Griglie strutturate:** sono formate da elementi di forma rettangolare o quadrangolare, nel caso bidimensionale, e da esaedri o prismi nel caso tridimensionale. Sono inoltre costituite da famiglie di linee parallele tra loro che

possono intersecare linee di famiglia diversa soltanto una volta. L'organizzazione rigorosa di questa tipologia di griglia permette di risolvere i sistemi di equazioni in modo molto efficiente e preciso, mediante l'utilizzo di codici di calcolo e metodi numerici modellati appositamente su di essa. Hanno il vantaggio di avere una struttura regolare e possono inoltre essere organizzate in blocchi per coprire specifiche regioni del dominio in modo tale da garantire un'elevata accuratezza solo dove necessario. A causa della loro struttura regolare possono essere usate solo per descrivere geometrie semplici, caratterizzate da pochi spigoli e zone poco complesse.

- **Griglie non strutturate:** sono formate da elementi di varia forma e sono generate quasi automaticamente da appositi algoritmi, richiedendo quindi uno sforzo minimo da parte dell'operatore. Le più comuni sono triangolari, nel caso bidimensionale, e formate da tetraedri o piramidi nel caso tridimensionale. Questa caratteristica fornisce il vantaggio di poter rappresentare qualsiasi dominio, dalla geometria più semplice alla più complessa, inoltre è facilmente raffinabile nelle zone di maggior interesse, dov'è richiesto un grado superiore di dettaglio. Grazie a queste caratteristiche questa tipologia di griglia si presta ad essere usata per ogni tipo di discretizzazione, in particolare con il metodo dei volumi finiti. La struttura irregolare si traduce di contro in una struttura non ordinata delle matrici associate alle equazioni algebriche da risolvere. Per questo motivo i metodi utilizzati per le griglie non strutturate risultano più lenti di quelli utilizzati per le griglie strutturate

- **Griglie ibride:** sono formate dalla combinazione di una griglia strutturata e di una non strutturata e permettono quindi di avere un'enorme flessibilità di impiego. Infatti, potendosi avvalere di celle di vario tipo, rendono possibile la suddivisione del dominio secondo le proprie esigenze. Gli unici svantaggi sono la complessità dell'implementazione e il tempo richiesto per definire la griglia ottimale.

2.1.2 *Solver*

Il *solver* è il cuore del codice CFD, consiste nella sequenza di calcolo che discretizza le equazioni di trasporto sulla *mesh* per poi risolverle. I metodi di approccio più utilizzati sono:

- Differenze finite
- Volumi finiti
- Elementi finiti

2.1.2.1 Metodo delle differenze finite

É un metodo utilizzato per geometrie semplici e *mesh* strutturate. Le incognite del fluido (velocità, pressione, temperatura e composizione) presenti all'interno delle equazioni differenziali alle derivate parziali vengono descritte solo in corrispondenza dei nodi e delle griglie di calcolo. In generale, le approssimazioni alle differenze finite delle derivate delle incognite vengono ottenute attraverso espansioni in serie di Taylor, utilizzando solo i valori delle incognite in corrispondenza dei nodi di griglia. Le derivate che compaiono in queste equazioni vengono sostituite da differenze finite, ottenendo così un sistema di equazioni algebriche per ciascuna variabile e per ogni nodo della griglia. In ciascun nodo compaiono dunque le variabili in corrispondenza del punto stesso e di quelli adiacenti.

2.1.2.2 Metodo dei volumi finiti

Questo metodo viene utilizzato per geometrie complesse ed è valido per tutte le tipologie di *mesh*, anche quelle non strutturate. Proprio per questo motivo è la tecnica più utilizzata nei codici di calcolo per le simulazioni fluidodinamiche. Il metodo dei volumi finiti suddivide il dominio di calcolo in un certo numero di volumi di controllo, mentre le equazioni di conservazione, scritte in forma integrale, vengono applicate su tali volumi. Vengono infine risolti gli integrali di volume e superficie tramite le apposite formule di quadratura, grazie alle quali sono valutate le variabili incognite nel centroide di ogni volume. Lo svantaggio rispetto al metodo delle differenze finite è rappresentato dalla maggior difficoltà con cui vengono costruiti e risolti gli schemi di calcolo di ordine elevato, specialmente nel 3D.

2.1.2.3 Metodo degli elementi finiti

Questo metodo divide il dominio di calcolo in una serie di volumi discreti, o elementi finiti, attraverso l'uso di griglie non strutturate. Le incognite φ vengono approssimate attraverso delle semplici funzioni a tratti, generalmente lineari o quadratiche, in modo tale da garantire la continuità di questa soluzione attraverso i contorni di ogni singolo elemento. Se le funzioni che approssimano φ venissero sostituite direttamente all'interno delle equazioni,

quest'ultime non sarebbero pienamente soddisfatte, ma presenterebbero un residuo. Per questo motivo è necessario moltiplicare le equazioni per una funzione peso prima di integrarle nel dominio di calcolo, in modo tale da minimizzare l'errore dovuto all'approssimazione. Infine queste equazioni, scritte in forma integrale, vengono risolte imponendo che la derivata degli integrali rispetto al valore di ogni nodo sia nullo, in tal modo si crea un sistema di equazioni algebriche non lineari. Un grosso vantaggio di tale metodo è la capacità di gestire geometrie molto complesse mentre lo svantaggio principale è dovuto al costo computazionale maggiore rispetto ai due metodi descritti in precedenza.

2.1.3 *Postprocessing*

Il *postprocessing* è la terza ed ultima fase che compone il codice CFD, viene effettuata subito dopo la risoluzione delle equazioni di trasporto. Tutti i codici implementano al loro interno degli strumenti che permettono di estrarre dai risultati numerici tutte le informazioni necessarie, come ad esempio la geometria del dominio e la griglia di calcolo, le mappe e grafici bidimensionali delle grandezze e le linee di corrente.

2.1.4 Analisi di sensitività

Prima di ogni simulazione CFD è necessario effettuare un'analisi di sensitività mediante la realizzazione e l'utilizzo di diverse *mesh* aventi differenti passi di griglia. Quest'analisi di sensitività è importante poiché permette di verificare che i risultati ottenuti non siano troppo influenzati dalla dimensione delle celle di calcolo utilizzate. Questa operazione viene svolta in fase preliminare per poter definire la *mesh* da utilizzare nelle simulazioni future.

2.2 Equazioni di trasporto

Le equazioni di trasporto descrivono il comportamento delle miscele multicomponente. Sono scritte in forma vettoriale estremamente generale in modo tale che, una vola esplicitate attraverso l'utilizzo di apposite formule matematiche, esse abbiano lo stesso significato fisico indipendentemente dal sistema di riferimento preso in considerazione. Infatti, nella fluidodinamica computazionale, in alcuni casi risulta necessario utilizzare, per descrivere geometrie complesse, dei sistemi curvilinei non ortogonali.

Di seguito verranno scritte le equazioni di trasporto nella loro formulazione differenziale, questa scrittura è quella più utilizzata perché valida per ogni sistema di riferimento. Queste equazioni possono essere ricavate, attraverso tre formulazioni differenti: Lagrangiana, Euleriana e macroscopica.

2.2.1 Equazioni di continuità

La conservazione della massa totale, scritta in termini differenziali, è espressa dalla seguente equazione:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v}) = 0 \qquad (16)$$

Con:

- ρ è la densità
- t è il tempo
- **v** è il vettore velocità.

Si ricorda che le lettere in grassetto rappresentano vettori.

2.2.2 Equazione di trasporto delle specie chimiche

L'equazione di conservazione delle specie chimiche viene scritta in termini massivi in modo tale da sfruttare alcune proprietà valide in ambito fluidodinamico.

In primo luogo è necessario individuare alcune importanti definizioni:

- $\mathbf{v_j}$ è la velocità della j-esima specie che costituisce la miscela rispetto al sistema di riferimento
- $\mathbf{v} = \sum_{j=1}^{NC} \omega_j \mathbf{v_j}$ è la velocità fluidodinamica, o velocità media massica, di una miscela di NC componenti
- ω_j è la frazione massiva
- $\mathbf{v_{jD}} = \mathbf{v_j} - \mathbf{v}$ è la velocità diffusiva di una specie rispetto alla velocità fluidodinamica
- $\dot{\boldsymbol{m}}_{\boldsymbol{j}} = \rho_j \mathbf{v_j}$ è il flusso di massa globale della specie j, è una quantità vettoriale che indica la massa della specie che attraversa l'unità di superficie nell'unità di tempo
- $\boldsymbol{j_j} = \rho_j \mathbf{v_{jD}}$ è il flusso di massa diffusivo
- $\rho_j \mathbf{v} = \dot{\boldsymbol{m}}_{\boldsymbol{j}} - \boldsymbol{j_j}$ è il flusso di massa convettivo

L'equazione di trasporto scritta in forma differenziale è:

$$\frac{\partial \rho_j}{\partial t} + \nabla(\rho_j \mathbf{v}) = -\nabla \boldsymbol{j_j} + R_j \tag{17}$$

Con:

- R_j è la velocità di formazione della j-esima specie

Riscritta in maniera più sintetica:

$$\frac{\partial \rho_j}{\partial t} + \nabla(\rho_j \mathbf{v_j}) = R_j \tag{18}$$

Definendo inoltre:

- $\sum_{j=1}^{NC} \boldsymbol{j_j} = 0$
- $\sum_{j=1}^{NC} R_j = 0$

È possibile ottenere, sommando le equazioni di conservazione delle NC specie, l'equazione (16) di continuità generale.

2.2.3 Equazione di conservazione della quantità di moto

L'equazione di conservazione della quantità di moto prende in considerazione le forze agenti sul volume di controllo, che possono essere distinte in:

- Forze superficiali → sono forze che agiscono sulle superfici, come forze di pressione, tensione superficiale e sforzi tangenziali.
- Forze di campo → sono quelle forze che agiscono sui volumi, come ad esempio forza peso e forza elettromagnetica.

L'equazione di conservazione scritta in termini differenziali è:

$$\frac{\partial(\rho\mathbf{v})}{\partial t} = -\nabla\underline{\boldsymbol{\Phi}} + \rho\boldsymbol{F} \qquad (19)$$

Con:

- $\underline{\boldsymbol{\Phi}} = \underline{\boldsymbol{\pi}} + \rho\mathbf{vv} = \rho\underline{\boldsymbol{\delta}} + \underline{\boldsymbol{\tau}} + \rho\mathbf{vv}$ è il tensore combinato dei flussi di quantità di moto, che raggruppa tutti gli sforzi agenti sulla superficie del volume di controllo
- $\underline{\boldsymbol{\pi}}$ è il tensore degli sforzi molecolari fomato da:
  - $\rho\underline{\boldsymbol{\delta}}$ è il tensore degli sforzi idrostatici
  - $\underline{\boldsymbol{\tau}}$ è il tensore degli sforzi viscosi
- $\rho\mathbf{vv}$ è il tensore dei flussi convettivi

Esplicitando i tre tensori che partecipano alla costruzione del tensore combinato si arriva a formulare l'equazione di conservazione della quantità di moto, chiamata anche equazione di Cauchy:

$$\frac{\partial(\rho\mathbf{v})}{\partial t} + \nabla(\rho\mathbf{vv}) = -\nabla P - \nabla\underline{\boldsymbol{\tau}} + \rho\boldsymbol{F} \qquad (20)$$

Con:

- $\rho\boldsymbol{F} = \rho\boldsymbol{g} + \rho\boldsymbol{f}$ →Contributo della forza esterna di cui il primo membro rappresenta il contributo associato alla forza peso del fluido

2.2.4 Equazione di conservazione dell'energia

L'equazione di conservazione dell'energia è:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left[\rho\left(\hat{U} + \hat{E}_K\right)\right] + \nabla\left[\rho\left(\hat{U} + \hat{E}_K\right)\mathbf{v}\right] = -\nabla\left(\underline{\boldsymbol{\pi}}\mathbf{v}\right) - \nabla\boldsymbol{q} + \rho F\mathbf{v} \qquad (21)$$

Dove:

- $\widehat{E}_K = \frac{1}{2}\mathbf{vv}$ è l'energia cinetica specifica associata alla velocità del flusso
- $\widehat{U} = \widehat{U}(P, T, \omega_j)$ è l'energia interna associata al moto di agitazione medio delle molecole e alla temperatura
- $\nabla \boldsymbol{q}$ è il contributo associato ai flussi diffusivi di energia

Il primo termine individua la velocità di accumulo dell'energia per unità di volume, il secondo la velocità di incremento dell'energia per unità di volume a causa del trasporto convettivo, mentre i termini a secondo membro rappresentano la velocità di incremento dell'energia per unità di volume dovuto alle forze di pressione, viscose, alle forze esterne e alla forza associata al campo gravitazionale.
L'equazione così scritta non è molto comoda da utilizzare per applicazioni pratiche, verranno dunque svolti alcuni passaggi algebrici in maniera implicita, per arrivare infine ad una scrittura più conveniente. In questi passaggi viene inoltre introdotta la definizione di entalpia:

$$\widehat{H} = \widehat{U} + \frac{P}{\rho} \qquad (22)$$

L'equazione finale di conservazione dell'energia per un fluido multicomponente, scritta in maniera esplicita e in funzione della temperatura è:

$$\rho C_P \frac{DT}{Dt} = \beta T \frac{DP}{Dt} - \sum_j \boldsymbol{j_j} \nabla \widehat{H}_j + Q_{diss} - \nabla \boldsymbol{q} + \sum_j \boldsymbol{F_j} \boldsymbol{j_j} + Q_R \qquad (23)$$

Dove:

- Q_{diss} è il calore dissipato per le forze di attrito
- $\beta = -\frac{1}{2}\frac{\partial \rho}{\partial T}$ è il fattore di comprimibilità
- $Q_R = -\sum_j \widehat{H}_j R_j$ è il calore di reazione

2.2.5 Equazioni costitutive

Le equazioni precedentemente descritte, applicate ad un continuo, formano un sistema di equazioni differenziali. Questo sistema risulta però indeterminato, in quanto il numero delle incognite è maggiore del numero di equazioni.

Le incognite sono:

- ρ → densità del fluido
- **u** → vettore velocità del fluido
- p → pressione
- Ê → energia totale specifica
- ω_j → frazione massiva della specie j-esima
- $\underline{\mathbf{\Phi}}$ → tensore degli sforzi
- $\mathbf{j_j}$ → flusso diffusivo della specie j-esima
- **q** → flusso di energia

I gradi di libertà risultano dunque essere 4, ovvero **q**, $\mathbf{j_j}$, p e $\underline{\mathbf{\Phi}}$. Per saturarli è necessario utilizzare delle leggi costitutive. Quest'ultime esprimono i flussi molecolari di quantità di materia, quantità di moto e quantità di energia introdotti nei bilanci, i quali sono funzione delle grandezze che caratterizzano il fluido. Tali leggi sono dunque la traduzione matematica di osservazioni empiriche e quindi costituiscono dei modelli.
È infine necessaria un'equazione di stato per determinare le variabili termodinamiche della miscela dei gas.

2.2.5.1 Legge di Fick

Descrive il flusso diffusivo di materia:

$$\boldsymbol{j}_j = \rho \Gamma_{j,mix} \nabla \omega_j \qquad (24)$$

In termini molari:

$$\boldsymbol{J}_j = \Gamma_{j,mix} \nabla C_j \qquad (25)$$

Con:

- $\Gamma_{j,mix}$ è la diffusività della specie j-esima nella miscela

2.2.5.2 Legge di Fourier

Descrive il flusso diffusivo di calore:

$$\boldsymbol{q}^T = -k \nabla T \qquad (26)$$

Con:

- k è la conducibilità termica della miscela, è funzione di temperatura, pressione e composizione.

2.2.5.2 Legge di Newton

La legge di Newton viene utilizzata per descrivere il tensore degli sforzi viscosi, il quale è diverso da zero solo quando il fluido è in movimento, a differenza di quello idrostatico che è sempre presente, anche quando il fluido è in quiete:

$$\tau_{ij} = -\mu \left(\frac{\partial v_j}{\partial x_i} + \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) + \left(\frac{2}{3}\mu - \kappa \right) \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \delta_{ij} \qquad (27)$$

Con:

- δ_{ij} è un elemento della matrice identità $\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
- μ è la viscosità dinamica
- κ è la viscosità di dilatazione

2.2.5.3.Equazione di stato

L'equazione di stato consente di esprimere la variabile di stato scelta in funzione di altre due variabili di stato del sistema. In questo lavoro di tesi le condizioni di lavoro sono tali da assumere l'ipotesi di gas perfetto, pertanto l'equazione di stato utilizzata è quella dei gas perfetti:

$$\mathrm{p} = \rho \mathrm{RT} \tag{28}$$

2.2.6 Equazioni di Navier-Stokes

Quando la legge di Newton viene utilizzata all'interno dell'equazione di Cauchy si ottiene un insieme di 3 equazioni che descrivono la conservazione della quantità di moto. Accoppiate con l'equazione di continuità vengono indicate come equazioni di Navier-Stokes.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{v}) = 0 \tag{29}$$

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla p + \nabla(\mu \nabla \mathbf{v}) + \mathbf{S} + \rho \boldsymbol{F} \tag{30}$$

Con:

- **S** è una grandezza che raggruppa tutti quei termini che ricevono un trattamento specifico nei metodi numerici comunemente utilizzati per la risoluzione di queste equazioni.

Per la componente x questa grandezza risulta essere:

$$S_x = \left\{ \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial v_x}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial v_y}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial v_z}{\partial x}\right) \right\} - \frac{\partial}{\partial x}\left[\left(\frac{2}{3}\mu - \kappa\right) \nabla \mathbf{v}\right] \tag{31}$$

2.3 Modellazione numerica turbolenta

La modellazione numerica utilizza diverse metodologie di simulazione per descrivere numericamente i flussi, le principali sono:

- Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)
- Large Eddy Simulation (LES)
- Direct Numerical Simulation (DNS)

Il metodo RANS descrive solamente il flusso medio e per questo motivo la turbolenza deve sempre essere modellata. Ha un costo computazionale basso poiché ricava solo i valori mediati nel tempo delle grandezze caratterizzanti il flusso.

Il metodo LES descrive in maniera diretta il moto dei grandi vortici che compongono la turbolenza, mentre modella quelli più piccoli della sottogriglia utilizzata come filtraggio spaziale. Il costo computazionale è più elevato rispetto al metodo RANS, ma le soluzioni sono più accurate dal momento che viene mantenuta la capacità di descrivere l'evoluzione dei grandi vortici.

Il metodo DNS descrive tutte le scale turbolente risolvendo le equazioni di Navier-Stokes, dell'energia e della specie, in modo rigoroso, senza alcun tipo di modellazione. Per questo motivo il costo numerico sarà dunque elevato, soprattutto se confrontato con gli altri due metodi.

2.4 Fire dynamics simulator – FDS

FDS è un modello di fluidodinamica computazionale, sviluppato dal National Institute of Standards and Technology [13], utilizzato per simulare flussi reattivi turbolenti tramite l'approccio LES.

È un *software open source* basato sulla risoluzione numerica di una forma semplificata delle equazioni di Navier-Stokes appropriata per le basse velocità, con particolare attenzione alla formazione di fumo e al trasporto di calore generato da un incendio.

Nel codice sorgente del programma Rehm e Baum hanno infatti sviluppato una forma semplificata delle equazioni di Navier-Stokes che prendono il nome di "equazioni della combustione per bassi numeri di Mach" [13]. Il numero di Mach è il rapporto tra la velocità del fluido e la velocità del suono nelle stesse condizioni. FDS, essendo limitato a flussi con numero di Mach inferiore a 0.3, non può essere utilizzato per flussi con velocità che si avvicinano a quelle del suono, come avviene per esplosioni o detonazioni, nelle quali sarebbe necessario considerare anche gli effetti della comprimibilità del fluido.
La fluidodinamica definisce come moto incomprimibile quel moto che non provoca delle significative variazioni di densità del fluido. Quando il numero Mach è sufficientemente basso, come nel nostro caso, il moto può essere considerato incomprimibile.

Le equazioni viste finora, semplificate per bassi numeri di Mach, si prestano bene a descrivere fenomeni legati allo sviluppo di fiamme, come ad esempio gli incendi da pozza, i quali sono caratterizzati da basse velocità, dominati dalla convenzione naturale, dall'energia termica rilasciata e dalle forze di galleggiamento.

Si può dunque capire come questo modello sia stato ideato principalmente per lo studio e la modellazione sia dei casi di incendio nell'ambito dell'ingegneria della sicurezza, che di altri fenomeni [14] come:

- Trasporto a basse velocità di calore e prodotti di combustione, per la maggior parte fumo
- Trasferimento di calore tra un gas e una superficie solida

- Pirolisi
- Sviluppo di un incendio
- Diffusione della fiamma
- Attivazioni di sprinkler e rilevatori di calore
- Soppressione del fuoco tramite *sprinkler*
- Trasporto diffusivo

2.4.1 Descrizione del modello

In FDS è possibile utilizzare solamente *mesh* strutturate 3D di forma esaedrica, per questo motivo le equazioni di trasporto vengono approssimate in una o più griglie di calcolo di geometria rettilinea. Quando nel dominio di calcolo sono presenti ostacoli solidi, essi sono forzati a conformarsi alla griglia sottostante, se così non fosse gli ostacoli sarebbero automaticamente approssimati dal *software*, che li porterebbe a coincidere con la griglia, senza però restituire alcun f*eedback* all'operatore, che rischierebbe di non accorgersene. Risulta quindi necessario porre particolare attenzione a tale aspetto nella fase di *preprocessing* per una corretta definizione della geometria, che deve risultare adattata al passo di griglia fissato.

I punti di forza di FDS sono la semplicità della griglia computazionale rettilinea utilizzata e che all'impiego di un risolutore veloce e diretto per il campo di pressione. Ciò può, di contro, costituire una limitazione qualora alcuni elementi della geometria non possano adattarsi a una forma esaedrica. Esistono tuttavia varie tecniche per superare tale problema, per esempio approssimando un contorno curvilineo con piccole e numerose celle rettangolari, nella raffigurazione 2D. Visto il tempo che richiederebbe la descrizione di un contorno curvo a mano, spesso si utilizzano dei programmi di grafica che, a mezzo di un apposito tool, permetto di esportare sotto forma di codice FDS quanto elaborato.

Le equazioni di trasporto che governano il sistema sono costituite da un set di sei equazioni differenziali alle derivate parziali in sei incognite, tutte in funzione del tempo e delle tre dimensioni dello spazio. Le sei incognite sono:

- La densità ρ
- Le tre componenti della velocità **v** =(u,v,z)
- La temperatura T
- La pressione p

Inoltre è necessario aggiungere una nuova incognita, la *mixture fraction*, e la rispettiva equazione di trasporto.

Tutte le equazioni di trasporto vengono infine discretizzate tramite un opportuno schema numerico in grado di valutare solo alcuni valori delle variabili d'interesse in corrispondenza di determinati punti della griglia di calcolo. FDS utilizza il metodo delle differenze finite per la risoluzione delle equazioni di conservazione e il metodo dei volumi finiti per la risoluzione dell'equazione del trasporto radiativo. Una volta discretizzate le soluzioni vengono aggiornate nel tempo per ogni cella della griglia di calcolo, dunque le variabili di stato risultano uniformi all'interno di ogni cella, infatti esse cambiano solo nel tempo.

2.4.2 Caratteristiche del modello

2.4.2.1 Modello idrodinamico

Come già accennato in precedenza, FDS risolve numericamente una forma delle equazioni di Navier-Stokes appropriata per i flussi reattivi a bassa velocità e il cuore di questo algoritmo risolutore consiste in uno schema esplicito di tipo *predictor-corrector*, accurato al secondo ordine, nel tempo e nello spazio. Questo metodo *predictor-corrector* cerca di combinare i vantaggi dei metodi espliciti, ovvero la poca richiesta di memoria che permette di avere limitati tempi di calcolo sul singolo step, e dei metodi impliciti, ovvero la stabilità. Il passo predittivo consiste nel trovare una soluzione approssimata della variabile al *time step* successivo attraverso un metodo esplicito, in questo caso Eulero esplicito:

$$\Phi_{n+1}^{*} = \Phi_n + f(t_n, \Phi_n)\Delta t \qquad (32)$$

L'asterisco sottolinea che il valore della variabile non è quello finale al tempo t_{n+1}. Questa soluzione viene dunque corretta andando ad applicare un metodo implicito, utilizzando Φ^*_{n+1} per calcolare la derivata. In questo passo viene impiegato il metodo del trapezio:

$$\Phi_{n+1} = \Phi_n + \frac{1}{2}[f(t_n, \Phi_n) + f(t_{n+1}, \Phi^*_{n+1})]\Delta t \qquad (33)$$

Questa procedura converge soltanto se il passo di integrazione Δt è molto piccolo.
La differenza tra il valore predetto e quello corretto fornisce informazioni sull'errore di troncamento locale e può essere utilizzato per controllare l'accuratezza e per aggiustare il passo di integrazione. Per terminare le iterazioni del metodo implicito ci sono le condizioni di terminazione:

$$\left|\Phi^k_{n+1} - \Phi^{k-1}_{n+1}\right| < \varepsilon \qquad (34)$$

Con:

- ε è la tolleranza, dunque un numero molto piccolo > 0

La turbolenza viene invece trattata attraverso l'approccio LES nella forma di Deardoff.

2.4.2.2 Modello di combustione

Per la combustione FDS utilizza due diversi modelli, in funzione del tipo di simulazione utilizzata, FDS può infatti utilizzare sia un approccio LES che DNS. Nel caso di simulazione DNS, dove il fenomeno di diffusione può essere modellato direttamente, il modello è basato su una reazione chimica ad unico *step* ed a velocità finita di tipo Arrhenius, mentre, nel caso di applicazione della LES, il modello si basa su una reazione a singolo stadio o a due stadi nella quale i prodotti vengono descritti tramite un modello *mixture fraction* a due parametri. Il concetto di *mixture fraction* viene definito come lo scalare passivo della frazione di gas in un dato punto del dominio fluido facente parte, almeno originariamente, della corrente di combustibile. La combustione risulta dunque essere sotto controllo fluidodinamico. Inoltre, grazie alle "relazioni di stato", a partire dalla *mixture fraction*, si possono ricavare le frazioni massive di tutte le specie di interesse. La *mixture fraction* Z(**x**,t) è una quantità scalare

conservativa, funzione di spazio e tempo, definita come frazione massiva della miscela gas originata a partire dalla corrente di combustibile. Questa, misurando il rapporto locale tra combustibile e ossidante, dà un'indicazione della quantità di combustibile presente in quella determinata zona. Da qui è facile intuire che Z(**x**,t) assumerà sempre valori compresi tra 0 e 1, 0 nella regione contenente soltanto combustibile e 1 dove la frazione di massa del combustibile è nulla.

$$Z = \frac{sY_F - (Y_O - Y_O^{\infty})}{sY_F^I + Y_O^{\infty}} \qquad (35)$$

Con:

- $s = \frac{\nu_O M_O}{\nu_F M_F}$
- Y è la frazione massiva
- F indica il combustibile (*Fuel*)
- O indica l'ossidante (*Oxydant*)
- I indica l'interfaccio (*Interface*)
- *v* è il coefficiente stechiometrico
- *M* è la frazione massiva

Lo schema cinetico implementato da FDS nel modello *mixture fraction* può essere sia a singolo stadio che a due stadi, in quest'ultimo caso nel primo step si ha l'ossidazione del combustibile a dare monossido di carbonio mentre nel secondo step il monossido di carbonio viene ossidato ad anidride carbonica. Il modello utilizzato assume che la combustione sia controllata dalla miscelazione, pertanto non appena i reagenti entrano in contatto danno origine al fenomeno in questione. La modellazione di sottogriglia dei fenomeni di estinzione utilizza inoltre delle regole empiriche che non consentono la combustione quando l'atmosfera circostante non è in grado di sostenerla.

2.4.2.3 Modello radiativo

Lo scambio termico radiativo è incluso nel modello tramite la soluzione della corrispondente equazione di trasporto RTE (*Radiative Transfer Equation*) un gas grigio, ovvero un gas ad

emissività costante su tutto lo spettro elettromagnetico. Quest'ultima viene risolta utilizzando un metodo ai volumi finiti con approssimativamente 100 angoli solidi, il che implica un modesto utilizzo della CPU nonostante la complessità del modello di radiazione per scambio del calore. I coefficienti di assorbimento della frazione del *gas-soot* vengono calcolati usando il modello *narrow-band*. Si tiene in considerazione inoltre un gas a emissività costante su tutto lo spettro elettromagnetico. Il trasferimento di calore di radiazione è incluso nel modello tramite la risoluzione della RTE per gas grigi e, in alcuni casi, tramite il modello *wide-band*.

2.4.2.4 Processi e processori in parallelo

FDS utilizza l'*Open Multi-Processing*, che permette di sfruttare, per una singola simulazione, più core di uno stesso processore. Di *default* il programma utilizza metà dei core a disposizione, ed ad ognuno di questi assegna un processo. È però possibile decidere autonomamente quanti processi, e quindi quanti core, utilizzare.

Tramite dei test eseguiti su diversi casi si è infatti dimostrato che l'utilizzo di più processi su macchine *multi-core* è vantaggioso, andando a ridurre i tempi di calcolo necessari anche del 50%, per esempio lavorando su 4 *core* anziché su uno. In Figura 22 si nota però che lavorare con più di 4 processi (*threads*) non porta sensibili vantaggi, quindi l'utilizzo di 4 *core* può essere considerato l'ottimo per simulazioni su *multi-core*.

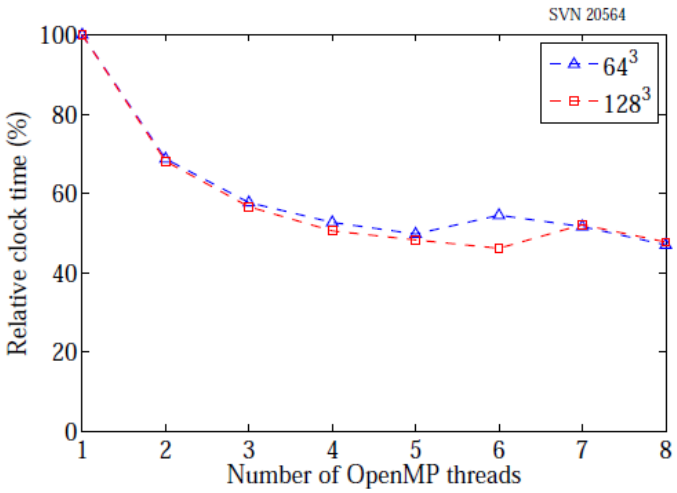


Figura 22 - Andamento dei tempi di calcolo in funzione del numero di processi utilizzato

Va sottolineato anche che tali considerazioni sono valide per qualsiasi dimensione del dominio di calcolo, come si nota in Figura 22, dove la curva blu, che indica il test con 64^3 celle, va a sovrapporsi con quella rossa, relativa ad un caso più grande, caratterizzato da 128^3 celle.

Nel caso si abbiano a disposizione più macchine, tramite l'MPI (*Message Passing Interface*) è possibile svolgere simulazioni in parallelo su più processori andando a ridurre ulteriormente i tempi di calcolo.
Solitamente, nel caso siano definite *mesh* multiple, FDS assegna ogni *mesh* ad un processo diverso. L'utente può scegliere di assegnare più processi allo stesso processore, ad esempio se si tratta di *mesh* piccole, oppure a processori diversi. La soluzione migliore per ottimizzare i tempi è quindi assegnare a processori dedicati i processi contenenti le *mesh* più pesanti e riunire le altre in un unico processore.

2.4.2.5 Condizioni al contorno

A tutte le superfici solide vengono assegnate determinate condizioni al contorno di carattere termico, oltre alle informazioni relative al comportamento del materiale in caso di combustione. Lo scambio termico e massivo con le superfici solide viene trattato in genere utilizzando delle correlazioni empiriche. FDS prevede la possibilità di valutare i flussi termici all'interno degli ostacoli solidi, nei quali si estende la *mesh* di calcolo. La definizione delle proprietà dei materiali è quindi di fondamentale importanza. È inoltre necessario specificare sia gli ingressi che le uscite di tutte le varie correnti di aria e delle sorgenti dei contaminanti.

2.4.3 Approccio LES

Come accennato in precedenza, FDS tratta la turbolenza utilizzando principalmente un approccio LES, mentre in alcuni casi semplificati l'approccio DNS. L'idea alla base della tecnica LES è che i vortici turbolenti di grandi dimensioni, che rappresentano la maggior parte del contributo alla miscelazione e che sono dipendenti dalla geometria e dalle condizioni al contorno, sono abbastanza grandi da essere calcolati con ragionevole accuratezza in maniera esplicita. Al contrario i vortici più piccoli, i quali sono isotropici e

poco dipendenti dalla geometria, è necessario che siano modellati per essere risolti mediante opportuni modelli di sottogriglia [15].

Le equazioni LES vengono ottenute non attraverso un'operazione di mediazione temporale, ma attraverso un operazione di filtraggio spaziale a partire dalle equazioni conservazione generali. In questo modo i fenomeni dissipativi, dovuti alla viscosità, alla conduttività termica e alla diffusività materiale, che si verificano a scale inferiori a quelle esplicitamente risolte nel dominio computazionale, vengono modellati.

Il metodo prevede la scelta di un opportuno filtro, caratterizzato da una certa ampiezza detta di *cut-off*, con lo scopo di risolvere nella simulazione non stazionaria del flusso tutti quei vortici che risultino avere dimensione caratteristica maggiore dell'ampiezza del filtro stesso.

In questa operazione di filtraggio le informazioni relative ai vortici più piccoli delle dimensioni del filtro verrebbero distrutte. Risulta dunque necessario, per tenere conto di queste informazioni perse, l'introduzione nelle equazioni filtrate gli sforzi turbolenti di sottogriglia o sforzi SGS (*Sub-Grid Scales*).

Il filtro spaziale viene definito attraverso un *kernel* o *filter function* L(x,x',Δ) secondo quanto segue:

$$\bar{\varphi}(x,t) \equiv L \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} L(x,x',\Delta)\varphi(x',t)dx'_1 dx'_2 dx'_3 \qquad (36)$$

Dove:

- $\bar{\varphi}(x,t)$ è la funzione filtrata,
- $\varphi(x,t)$ è la funzione originale non filtrata
- Δ è l'ampiezza del filtro

Per le simulazioni LES basate sul metodo dei volumi finiti si utilizza un filtro *top-hat* o *box*, mentre per quelle basate sul metodo delle differenze finite un filtro Gaussiano.

Filtro *top-hat*:

$$L(x,x',\Delta) = \begin{cases} \frac{1}{\Delta^3} & |x-x'| \leq \Delta/2 \\ 0 & |x-x'| > \Delta/2 \end{cases} \quad (37)$$

Filtro Gaussiano:

$$L(x,x',\Delta) = \left(\frac{\gamma}{\pi\Delta^2}\right)^{2/3} exp\left(-\gamma\frac{|x-x'|^2}{\Delta^2}\right) \quad (38)$$

Con:

- γ è una costante il cui valore è pari a 6

L'ampiezza di *cut-off* del filtro è da intendersi come misura indicativa dei vortici che possono essere risolti dalla simulazione oppure dalla dimensione massima dei vortici che andranno modellati.

In FDS l'ampiezza del filtro viene presa come la radice cubica del volume di ogni singola cella:

$$\Delta = \sqrt[3]{V_c} = \sqrt[3]{\delta x \delta y \delta z} \quad (39)$$

L'azione del filtro porta quindi ad una semplificazione delle caratteristiche del moto, infatti all'aumentare dell'ampiezza i dettagli vengono fortemente ridotti, rendendo la rappresentazione incompleta e insoddisfacente. Il filtro verrà indicato con la seguente notazione:

$$L:\ \varphi \rightarrow \overline{\varphi}$$

Poiché si tratta di un fluido comprimibile, viene utilizzata la media di Favre, al posto di quella di Reynolds, in questo modo si evita la creazione di termini addizionali difficilmente risolvibili. La generica variabile mediata è così definita:

$$\tilde{\varphi} = \frac{\overline{\rho\varphi}}{\overline{\rho}} \quad (40)$$

Dove:

- $\tilde{\varphi}$ è la variabile mediata con Favre

- $\overline{\varphi}$ è la variabile mediata con Reynolds, usata in precedenza

La generica grandezza φ può quindi essere scomposta in una componente media e una componente fluttuante:

$$\varphi = \tilde{\varphi} + \varphi''$$

Le equazioni LES, di continuità e del moto, per un fluido comprimibile con proprietà costanti sono:

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \nabla(\bar{\rho}\tilde{\boldsymbol{v}}) = 0 \qquad (41)$$

$$\frac{\partial \bar{\rho}\tilde{\mathbf{v}}}{\partial t} + \nabla(\bar{\rho}\tilde{\mathbf{v}}\tilde{\mathbf{v}}) = -\nabla\bar{p} - \nabla\underline{\bar{\tau}} - \nabla\underline{\boldsymbol{\tau}}^{sgs} \qquad (42)$$

Dove:

- $\underline{\boldsymbol{\tau}}^{sgs} = \overline{\rho}(\widetilde{\mathbf{v}\mathbf{v}} - \tilde{\mathbf{v}}\tilde{\mathbf{v}})$ è il tensore degli sforzi turbolenti comprimibile, chiamato anche tensore degli sforzi di sottogriglia
- $\underline{\bar{\boldsymbol{\tau}}}$ è il tensore degli sforzi viscosi per un fluido newtoniano

La presenza del termini di sottogriglia è attribuibile al trasporto convettivo della quantità di moto e delle interazioni tra i vortici risolti e quelli modellati, sottolinea inoltre che la modellazione coinvolge strutture che sono più piccole della dimensione che corrisponde all'ampiezza del filtro Δ. Questi sforzi di sottogriglia contengono degli ulteriori contributi che è possibile evidenziare esplicitando la decomposizione della generica variabile $\varphi(\mathbf{x},t)$ come:

$$\varphi(x,t) = \tilde{\varphi}(x,t) + \varphi'(x,t) \qquad (43)$$

Dove:

- $\tilde{\varphi}(\mathbf{x},t)$ è il contributo filtrato che è caratterizzato dalle variazioni spaiali più larghe dell'ampiezza del filtro
- $\varphi'(\mathbf{x},t)$ è il contributo non filtrato che contiene tutte le informazioni relative alle scale non risolte e quindi tutte le variazioni che avvengono ad una scala più piccola dell'ampiezza del filtro

Tutte le variabili presenti nell'equazione sono primitive o calcolabili, tranne il tensore degli sforzi di sottogriglia $\boldsymbol{\tau_{ij}^{sgs}}$, che necessita di una chiusura. Questo tensore è funzione della viscosità dinamica di sottogriglia, chiamata per semplicità viscosità turbolenta μ_t. È proprio quest'ultimo termine che necessita di essere modellato.

Nell versioni dalla 1 alle 5 FDS modellava questo termine con il metodo Smagorinsky [16]:

$$\mu_t = \rho(C_s\Delta)^2\left(2S_{ij}S_{ij} - \frac{2}{3}(\nabla v)^2\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (44)$$

Dove:

- $S_{ij} \equiv \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right)$ è il tensore degli sforzi viscosi
- $C_s = 0{,}2$ è una costante
- $\Delta = \sqrt[3]{V_c} = \sqrt[3]{\delta x \delta y \delta z}$ è l'ampiezza del filtro

La versione 6 di FDS può utilizzare il Modello Dinamico Smagorinsky, nel quale il coefficiente C_s non è più assunto costante ma viene calcolato a seconda delle condizione locali del flusso.

La versione 6.1.2 utilizza di *default* una variazione del modello di Deardorff's:

$$\mu_t = \rho C_v \Delta \sqrt{k_{sgs}} \qquad (45)$$

Dove:

- $k_{sgs} = \frac{1}{2}((\bar{u} - \hat{u})^2 + (\bar{v} - \hat{v})^2 + (\bar{w} - \hat{w})^2)$ è l'energia cinetica turbolenta
    - $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ sono le velocità medie, nelle tre direzioni, calcolate nel centro della cella
    - $\hat{u}, \hat{v}, \hat{w}$ sono le velocità medie ponderate sulle celle adiacenti
- C_v è una costante impostata al valore 0.1

2.5 Smokeview

2.5.1 Introduzione

Smokeview è uno strumento per la visualizzazione di simulazioni fluidodinamiche scritto in diversi linguaggi di programmazione. La parte del *software* che gestisce la visualizzazione a schermo dei dati è scritta in linguaggio C, la porzione che legge i file generati da FDS è scritta in linguaggio Fortran, mentre per tutto ciò che riguarda la decompressione dei file e il *render* delle immagini si usano librerie esterne [17].

2.5.2 Potenzialità

Il programma consente di visualizzare i risultati ottenuti con FDS e CFAST. Tali programmi generano, insieme ad altri, un file con estensione *.smv* che permette la riproduzione tridimensionale del caso simulato e di tutte le variabili di interesse. Aprendo questo file è possibile sia osservare la scena riprodotta, che muoversi al suo interno grazie a semplici comandi da tastiera. Successivamente verranno presentati solo quelli che sono stati maggiormente utilizzati durante il lavoro.

Tramite semplici menu a tendina, oltre a visualizzare la geometria del caso in analisi e la *mesh* utilizzata, si può usufruire diversi *tool*. Tra i più significativi sono presenti gli *slice*, ossia piani di sezione animati di una determinata variabile in una certa posizione, e le *isosurface*, cioè superfici tridimensionali caratterizzate dallo stesso valore numerico di una determinata grandezza, entrambi accessibili attraverso il comando *load*. In Figura 23 è mostrato un esempio di *slice* di una componente della velocità, relativo ad una semplice vasca di trattamento ventilata tramite *push-pull*.

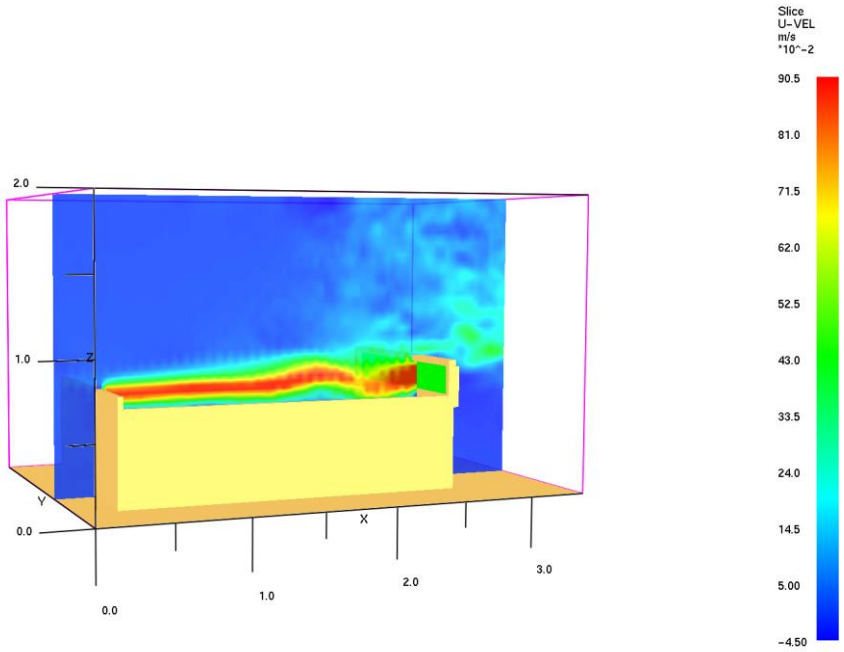


Figura 23 – Esempio di slice di velocità per un sistema push-pull primitivo a regime

Per visualizzare le grandezze vettoriali si possono utilizzare inoltre *slice* vettoriali, ovvero *slice* rappresentate da un insieme di piccoli vettori colorati, le quali sostituiscono i semplici piani colorati. In questo caso vengono indicate non solo l'intensità ma anche la direzione ed il verso della variabile.

È necessario sottolineare che il software permette solamente la visualizzazione di *slice*, di *isosurface* ed in generale di tutti i diversi strumenti, esplicitati nel *file di input* lanciato con FDS, attraverso un sistema di coordinate cartesiane. Per sfruttare a pieno il programma è dunque importante capire e decidere, già in fase di preparazione del *file di input*, quali saranno le necessità per l'analisi dei risultati.

2.5.3 Tracers

Nei problemi di fluidodinamica spesso risulta utile associare un tracciante ad un determinato flusso di gas, in modo da poterne seguire la traiettoria. Proprio a tal fine Smokeview presenta la funzione *tracers*, ossia particelle. Queste particelle sono prive di massa e quindi non

influenzano la simulazione, sono inoltre associate ad un determinato flusso permettendo di seguirne visivamente l'evoluzione.
Spesso tali particelle non vengono utilizzate poiché appesantiscono in maniera non trascurabile la simulazione, aumentando consistentemente i tempi di calcolo.

2.5.4 *Post-processing*

Per quanto riguarda il *post-processing*, oltre alla possibilità di visualizzare le sopraccitate *slice* e *isosurface*, il programma permette di osservare il caso da ogni punto di vista e con qualsiasi livello di ingrandimento.

Un ruolo importante, che risulta fondamentale in tutte quelle situazioni in cui è necessario confrontare casi analoghi che differiscono soltanto per una o poche variabili, è quello che permette la scrittura di uno *script*. Quest'ultimo consente di eseguire le medesime operazioni, al fine di non ripetere, per i diversi casi simulati, le stesse identiche operazioni. Per esempio è possibile creare uno *script* che ponga l'osservatore in un certo punto, successivamente carichi determinate slice e infine salvi le immagini in precisi istanti temporali.

2.5.5 Funzionalità aggiuntive

Smokeview viene utilizzato principalmente per l'analisi dei risultati, quindi nelle fasi finali del lavoro, esso può però tornare utile anche in fase preliminare, prima di lanciare la simulazione vera e propria in FDS, al fine di controllare che la geometria e la *mesh* siano quelle desiderate. Per fare ciò basta imporre nel file di input un tempo di simulazione pari a zero secondi, successivamente FDS genera un file *.smv* statico, contenente tutte le informazioni utili a capire se il caso da studiare è stato trascritto correttamente in codice, posizione dei *device* e delle *slice* inclusi. In Figura 24 si può osservare la *mesh* e la geometria scritta in input, sempre relativa all'esempio di Figura 23.

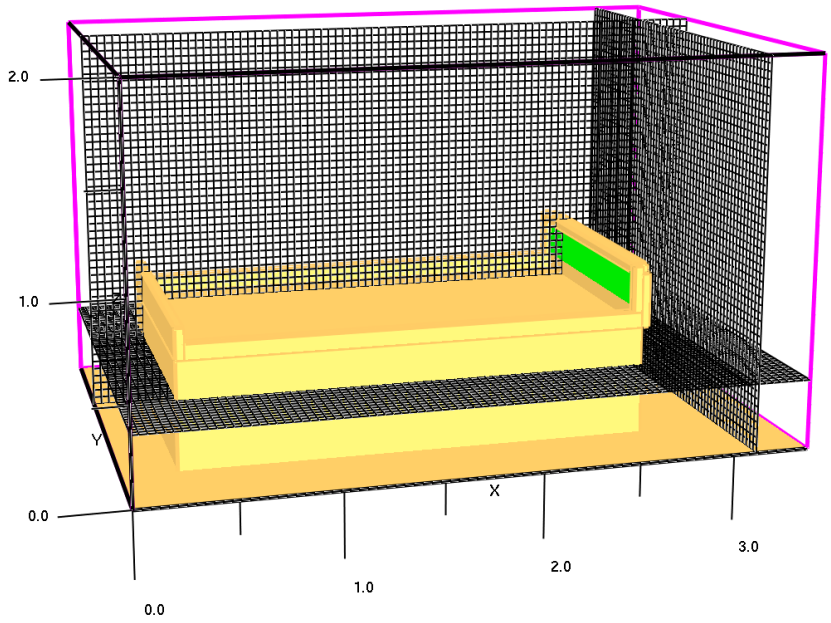


Figura 24 - Visualizzazione della *mesh* adottata sui tre piani x, y e z

Smokeview può essere utilizzato anche durante la fase di *processing*, sia per controllare che la simulazione proceda come previsto, che per avere un'idea preliminare dei risultati. Tale opportunità può tornare molto utile, soprattutto in caso di simulazioni molto lunghe, perché permette di effettuare correzioni ed eventualmente di far ripartire la simulazione senza dover aspettare che questa venga prima portata a termine.

CAPITOLO 3

Convalida del modello

3.1 Necessità di una convalida

Prima di procedere con lo studio di sistemi di ventilazione *push-pull* per vasche di trattamento contenenti ostacoli, è necessario valutare l'attendibilità e l'affidabilità dello strumento di calcolo utilizzato per questo particolare tipo di applicazione. Tale verifica è fondamentale per assicurarsi che la simulazione con FDS non porti a risultati devianti, magari dovuti ad errori cronici imputabili all'impostazione del *software*.
In questo lavoro di tesi la convalida assume, se possibile, un'importanza ancora maggiore, poiché FDS nasce come *software* per la simulazione di fiamme e incendi, e non risulta essere mai stato utilizzato per analisi di pura ventilazione di inquinanti.

Per portare a termine questa verifica la soluzione migliore è sicuramente il confronto di dati ottenuti attraverso il *software* con dati sperimentali, in modo tale da testare la capacità del programma di rappresentare la fisica del problema in analisi e apprezzarne l'eventuale scostamento. Al contrario, confrontare i risultati ottenuti con FDS con quelli ricavati dall'uso di un altro programma di simulazione fluidodinamica, potrebbe portare a introdurre errori significativi o distorcere dati e tendenze reali.

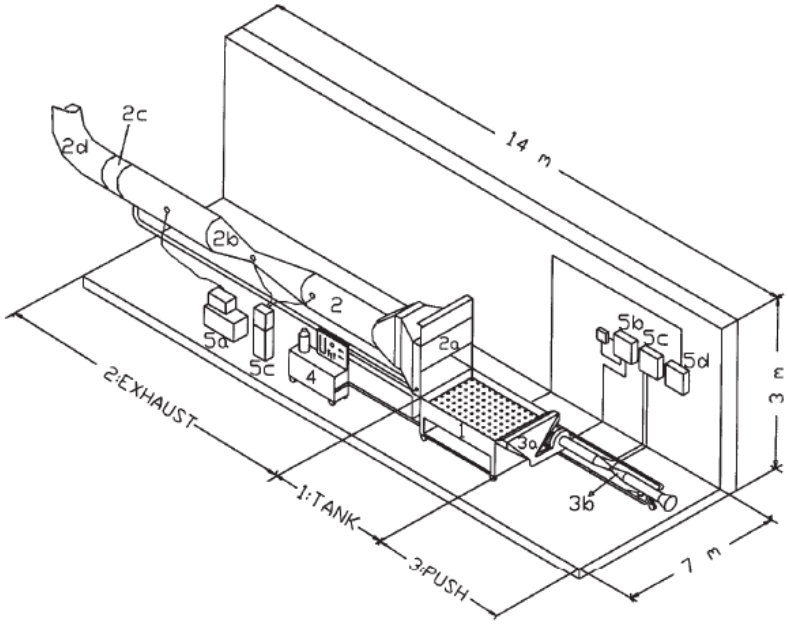
3.2 Caso studio per la convalida

La ricerca di prove sperimentali adatte ad effettuare la convalida del modello si è basata su due criteri, la semplicità del caso analizzato e la riproducibilità dello stesso.

È stato necessario trovare un caso riguardante un sistema di ventilazione *push-pull* essenziale, che contenesse dati concentrati in particolar modo sulla ventilazione e sull'efficienza di cattura, in modo tale da non complicare in maniera eccessiva la comprensione dell'adattabilità del *software* alla nostra applicazione. Il sistema, comprensivo di vasca aperta, elemento di spinta e cappa aspirante, doveva inoltre avere dimensioni riproducibili in tempi di calcolo ragionevoli.

Tali requisiti sono soddisfatti dal lavoro svolto da Marzal *et al.* (2002) e riassunto nell'articolo intitolato "*Influence of Push Elemenmt Geometry on the Capture Efficiency of Push-pull Ventilation Systems in the Surface Treatment Tanks*" [4]

3.2.1 Geometria della vasca



Overview of the pilot installation. 1, Tank; 2, exhaust system; 2a, exhaust hood; 2b, venturi; 2c, fan; 2d, chimney; 3, push system; 3a, plenum chamber; 3b, venturi; 4, F_6S generator; 5, control systems; 5a, infrared spectrophotometer; 5b, hiccough fans; 5c, flow meter; 5d, tank temperature control.

Figura 25- Schema dell'impianto utilizzato per l'attività sperimentale

La vasca utilizzata, e mostrata in Figura 25, ha una lunghezza di 1.80 [m] ed una larghezza di 1.60 [m], mentre nessuna informazione è data riguardo all'altezza. Tale parametro non è comunque di grande interesse perché non influenza in alcun modo l'efficienza del sistema di ventilazione. Per questo motivo la vasca è stata riprodotta con un'altezza tale da non ingrandire troppo il dominio di calcolo ma abbastanza alta da permettere il completo sviluppo di eventuali ricircoli dell'aria in prossimità del bordo della vasca.

Il sistema di push è composto da un *plenum*, nel quale viene convogliata l'aria che forma il getto di spinta, e da uno *slot*, attraverso il quale l'aria viene immessa nel sistema di ventilazione. Lo *slot*, posto alla fine del *plenum*, è solitamente costituito da un tubo forato, con dimensioni e spaziatura tra i fori variabili. Quello in analisi ha fori circolari ed è lungo 1.60 [m], in modo tale da ricoprire tutta la larghezza della vasca. Per quanto riguarda numero e dimensioni dei fori, gli esperimenti sono stati condotti con due diverse configurazioni: uno *slot* avente 13 fori di 0.02 [m] di diametro, e uno con 52 fori dal diametro di 0.01 [m]. Vale la pena di sottolineare che le due configurazioni descritte, seppur diverse, sono caratterizzate da superficie totale aperta uguale e pari a $4.084*10^{-3}$ [m^2].

Questo flauto di emissione ha una sezione circolare e un angolo di inclinazione del getto di spinta pari a 0°, dunque parallelo alla superficie della vasca. La portata di *push*, misurata tramite un sistema Venturi e regolata tramite un ventilatore a singhiozzo, può variare da 0.0025 a 0.40 [m^3/s].

L'ultima cosa da sottolineare è che l'elemento di spinta è posizionato ad un'altezza di 0.10 [m] rispetto alla superficie della vasca, la minima altezza a cui di solito viene posto per evitare che venga sommerso in seguito all'introduzione di un pezzo da trattare in vasca.

La cappa di aspirazione, di forma rettangolare, è larga 1.60 [m], alta 0.30 [m] e rialzata di 0.01 [m] rispetto alla superficie della vasca, sempre per evitarne l'immersione. Per quanto riguarda la portata di aspirazione questa è settata a diversi valori, tutti compresi tra 0.175 e 0.248 [m^3/s].

3.2.2 Tracciante ed efficienza

Per le misurazioni dell'efficienza di cattura viene utilizzato come gas tracciante l'esafluoruro di zolfo (SF_6), che viene miscelato, in concentrazione non specificata, ad una portata d'aria di 20 [l/min], pari a $3.33*10^{-4}$ [m^3/s]. Questa miscela può essere iniettata, sia nella griglia

forata posta sotto la superficie della vasca, che direttamente in cappa. La superficie forata di introduzione del gas può inoltre essere riscaldata, tramite un sistema di resistenze elettriche, così da poter iniettare il gas alla temperatura desiderata, nei casi analizzati tra i 50 [°C] e i 100 [°C].

La concentrazione di gas tracciante viene determinata con un analizzatore ad infrarossi direttamente nel tubo dei gas esausti dopo il sistema Venturi, in modo tale da essere certi che il gas e l'aria siano perfettamente miscelati.
L'efficienza totale del sistema è definita come:

$$E_T = {C_a}/{C_{aT}} \tag{46}$$

Dove:

- C_a è la concentrazione del gas tracciante, misurata nel tubo dei gas esausti, quando quest'ultimo viene iniettato attraverso la griglia forata.
- C_{aT} è la concentrazione del gas tracciante, misurata nel tubo dei gas esausti, quando quest'ultimo viene iniettato direttamente nel tubo dei gas esausti.

3.2.3 Caso analizzato

La prova sperimentale riportava due diversi casi, i quali differivano solo per la configurazione del flauto forato, come è possibile vedere in Tabella 3.

Tabella 3 – Caratteristiche della prova sperimentale considerata

Diametro fori ugello [mm]	**Numero fori [-]**	**Area totale ugello [mm^2]**	**Temperatura [°C]**	**Portata aspirata [m^3/s]**
10	13	4084	50	0.200
20	52	4084	50	0.200

La portata di *push* inoltre non era fissa, come quella d'aspirazione, ma variabile, in modo tale da poter valutare l'efficienza di cattura in funzione della variazione di quest'ultima. Questo andamento è riportato in Figura 26, dove E_T indica l'efficienza totale, Q_i la portata del getto di *push* e S l'area totale dei fori:

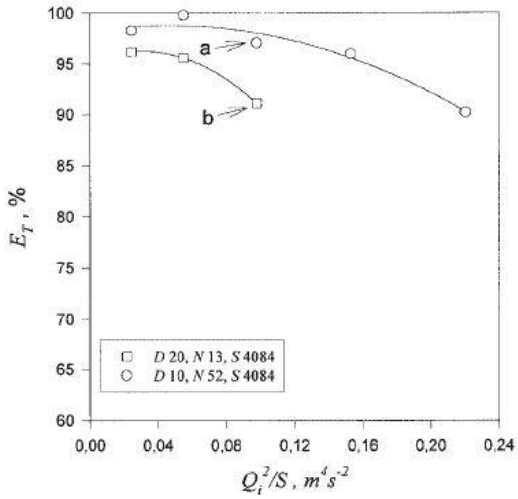


Figura 26 - Curve di efficienza di cattura del caso sperimentale

Per la convalida del modello si è fatto riferimento alla serie di condizioni sperimentali che hanno determinato la curva di Figura 26. In particolare si è simulata la curva legata all'ugello con numero maggiore di fori, sia perché caratterizzata da efficienze più alte e quindi di maggior interesse, sia perché la lama d'aria a cui verrà approssimato il getto in fase di simulazione è meglio rappresentata da 52 piccoli fori piuttosto che da 10 grandi.
Estraendo i dati riportati dalla Figura 26 ed eseguendo alcuni semplici conti per poter passare dal rapporto $(Q_i^2)/S$ alla velocità, si ricavano i valori di Tabella 4:

Tabella 4 - Dati ricavati dalla curva alta di Figura 26

Punti di *figura 25* [-]	**Efficienza [%]**	**Velocità getto [m/s]**
1	98.39	2.436
2	99.86	3.668
3	97.05	4.893

Punti di *figura 25* [-]	**Efficienza [%]**	**Velocità getto [m/s]**
4	95.97	6.131
5	90.20	7.350

I punti sul grafico di Figura 26 sono stati numerati a partire dal primo a sinistra, mentre l'efficienza è stata arrotondata alla seconda cifra decimale. Le simulazioni utili alla convalida del modello, sono state condotte solamente sui primi tre punti, poichè in quest'ultimi l'efficienza di cattura rientrava nelle percentuali tipiche dei sistemi di ventilazione progettati in maniera ottimale. Inoltre gli ultimi due punti sperimentali sono in condizioni che non seguono le norme ACGIH, le quali consigliano che la portata di aspirazione sia all'incirca doppia rispetto a quella proveniente dal getto, come decritto nell'equazione (12).

3.3 Adattamento del caso sperimentale

Per poter simulare questi casi sperimentali tramite FDS, sono state introdotte alcune modifiche al sistema, prestando però attenzione a non alterare troppo o in modo ingiustificato le configurazioni.

3.3.1 Geometria del *push*

La prima semplificazione riguarda l'ugello di emissione del getto di spinta, un flauto forato la cui rappresentazione in FDS avrebbe introdotto alcune difficoltà poichè questo programma si basa su *mesh* con celle esaedriche. La descrizione dei fori avrebbe comportato l'approssimazione degli stessi con piccolissimi esaedri, costringendoci quindi ad utilizzare quindi un passo di griglia molto piccolo, affinché tale approssimazione non risultasse troppo grossolana. L'utilizzo di un passo di griglia estremamente fine avrebbe comportato tempi di calcolo molto lunghi, dunque si è deciso di sostituire lo *slot* forato con un più semplice elemento rettangolare avente una fessura dalla quale viene emesso il getto d'aria.
Tale fessura dovrebbe però avere area equivalente pari a quella totale dei fori, ossia $4.084*10^{-3}$ [m^2], ma anche questo accorgimento avrebbe creato ancora una volta la necessità di avere un passo di griglia molto piccolo, dell'ordine dei millimetri. Dal momento che, come già ribadito, non è possibile ricorrere a queste dimensioni di *mesh*, si è ricorsi ad un piccolo espediente per la descrizione del getto di spinta.

3.3.2 Getto di spinta

Ad una certa distanza dal flauto forato, i getti d'aria in uscita dei fori si uniformano dando origine ad una lama d'aria, la quale perde memoria della forma dell'ugello che l'ha generato [5], è possibile vedere questo comportamento in figura 27. Sfruttando questa caratteristica è possibile sostituire, ad una certa distanza, i tanti piccoli getti d'aria dai fori dell'ugello, da un'unica cortina d'aria uniforme avente precise dimensioni.
La distanza alla quale i getti si uniscono è funzione delle caratteristiche dei fori, infatti per diverse configurazioni si hanno diversi andamenti:

$$\frac{S}{\sqrt{A_0}} \tag{44}$$

Dove:

- S è la distanza tra i centri di due fori adiacenti
- A_0 l'area del singolo foro,

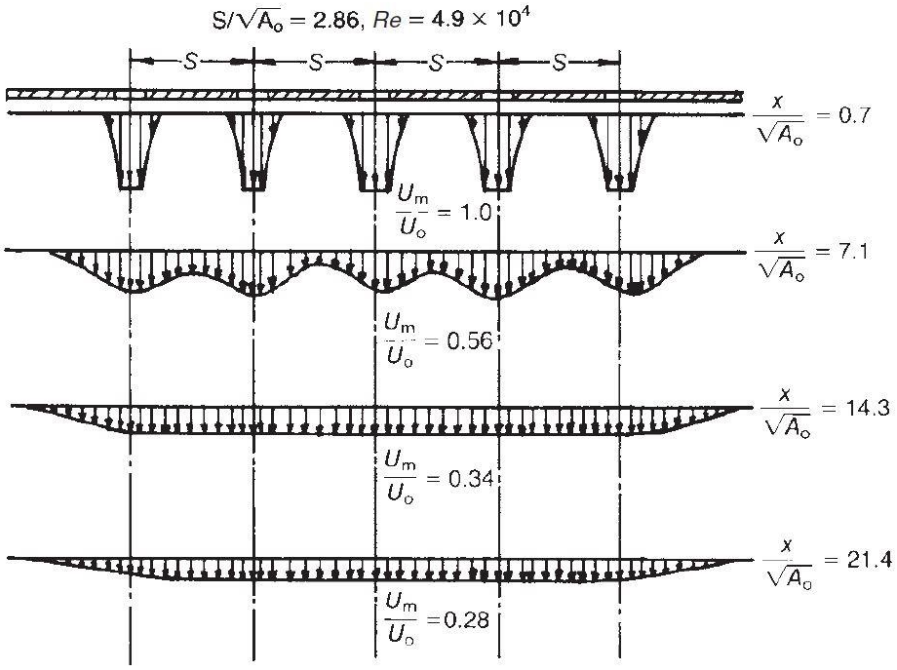


Figura 27 - Schema dello sviluppo fluidodinamico da un ugello forato

All'aumentare della distanza x dai fori, è possibile vedere come la portata complessiva di aria aumenti, mentre la velocità, rappresentata dai vettori, diminuisca. Dalle formule in Figura 27 è dunque possibile ricavare sia la distanza x, che la velocità dell'aria U_m presente a questa distanza, U_0 rappresenta invece la velocità iniziale in uscita dai fori.

La lama d'aria di nostro interesse si forma alle seguenti condizioni:

$$\frac{x}{\sqrt{A_0}} = 14{,}3 \tag{45}$$

$$\frac{U_m}{U_0} = 0{,}34 \tag{46}$$

Nel caso in analisi, la distanza alla quale il getto uscente dal flauto assume le caratteristiche di una cortina è pari a 0.1267 [m], mentre le nuove velocità U_m, usate per i punti della convalida, vengono riportate in Tabella 5.

Tabella 5 - Velocità della lama d'aria simulata

Punto di *figura 25* [-]	**Efficienza [%]**	**Velocità lama d'aria [m/s]**
1	98.39	0.828
2	99.86	1.247
3	97.05	1.664

Il passo successivo è stato quello di calcolare le dimensioni che la lama d'aria assume alla distanza x. Prendendo una sezione del flauto forato, raffigurata in Figura 28, si nota che l'altezza H del semi-getto sviluppato, forma un triangolo rettangolo di ipotenusa L e con l'altro cateto di valore pari alla distanza x. L'angolo α di apertura è compreso tra 12 e 15 gradi [2].

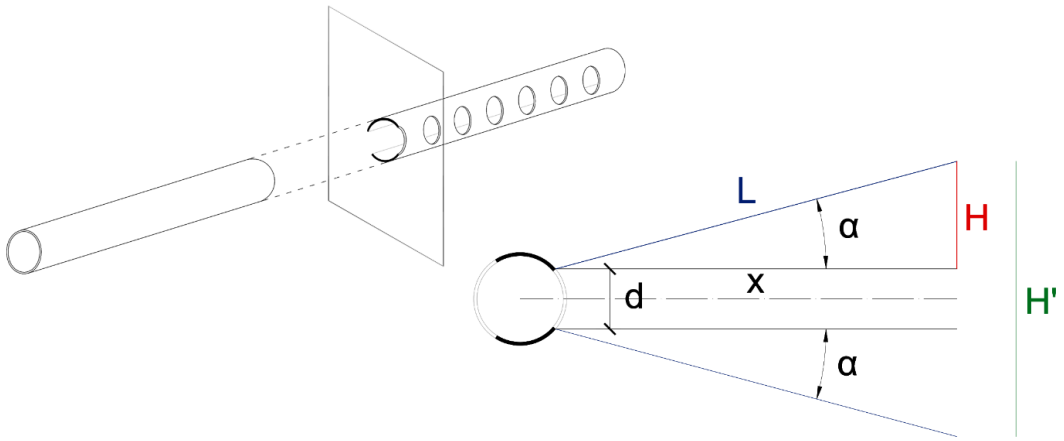


Figura 28 - Rappresentazione schematica di una sezione del getto fuoriuscente da un foro dell'ugello di spinta

Sfruttando la trigonometria, e considerando un angolo di apertura α=15°, è possibile calcolare l'altezza H del semi-getto come:

$$H = x * tan(\alpha) = 0.0339\ [m] \tag{47}$$

Dato che i fori hanno altezza d=0.01 [m], l'altezza della cortina risulta essere pari a:

$$H' = H * 2 + d = 0.0779\ [m] \tag{48}$$

Tale valore è stato successivamente arrotondato ad $H' = 0.08\ [m]$.

Il valore scelto di α rappresenta il caso peggiore, infatti maggiore è questo valore, maggiore è la quantità di aria inglobata per *entrainment*. Ciò aumenta il rischio che la sostituzione del flauto forato con la lama d'aria comporti portate d'aria eccessive rispetto alla realtà. Partendo da un angolo, come detto in precedenza, pari a 15°, durante le simulazioni sono state effettuate delle variazioni di quest'ultimo, restando entro il range indicato, nel caso in cui la portata che arriva in cappa sia troppo alta.

Valutate tutte le grandezze del getto alla distanza x, si impone quest'ultimo come getto di spinta, trascurando la distanza x che ha già percorso, questa è un'ipotesi ragionevole, poiché si tratta di circa 0.12 [m] a fronte di una vasca lunga 1.80 [m]. Tale ipotesi è stata comunque oggetto di verifica nel corso delle attività di tesi e verrà discussa in seguito. Così facendo il

getto risulta caratterizzato da dimensioni più grandi, ben rappresentabili anche con grigliature da 0.04, 0.02 e 0.01 [m] come quelle da cui si ha intenzione di partire per la convalida. Inoltre il getto, avente un'ampiezza di 0.08 [m], è descritto, lungo l'asse delle altezze, da 2, 4 e 8 celle rispettivamente, e quindi con sufficiente accuratezza. Si ritiene infatti che il getto sia ben rappresentato se descritto almeno da due celle lungo la sua dimensione minore.

3.3.3 Tracciante

Al posto dell'esafluoruro di zolfo, è stato utilizzato come tracciante del semplice monossido di carbonio. Questo è conveniente perché il CO è una specie i cui dati termodinamici sono inclusi nel *software* e non è quindi stato necessario l'inserimento manuale di dati fisici e termodinamici, evitando i rischi legati ad una gestione anomala di composti particolari, come l'esafluoruro di zolfo, a cui il programma non è abituato.

Inoltre il CO, avendo peso comparabile con quello dell'aria, simula perfettamente un inquinante che evapora dalla vasca, dal momento che non rischia di incorrere in problemi di ristagno legati alla sua densità.

La piastra forata, dalla quale viene immessa la miscela di tracciante e aria, è stata sostituita da una semplice superficie d'emissione uniforme, avente le stesse dimensioni. Questo in parte per semplificare la struttura dell'input per FDS, ma soprattutto per avere maggior uniformità di condizioni sulla vasca. Inoltre tale assunzione diminuisce sensibilmente i tempi di calcolo perché viene descritto un unico ingresso, anziché una superficie composta da piccoli getti molto vicini tra loro, situazione che complicherebbe la risoluzione delle equazioni di bilancio.

Durante la fase preliminare della convalida sono state inoltre effettuate delle prove per valutare se l'introduzione del tracciante tramite un getto uniforme, piuttosto che attraverso un numero maggiore di getti più piccoli, desse origine a dei disturbi del campo di moto del sistema di ventilazione. Non si è notata però alcuna differenza nei profili di velocità, come ampiamente prevedibile data l'esigua portata di tracciante introdotto e la bassa velocità che caratterizza questa corrente.

3.3.4 Cappa d'aspirazione e altre semplificazioni

È stata aggiunta, rispetto al caso sperimentale, una sottile "cornice", di una o due celle, a seconda delle dimensioni della *mesh*, in ogni direzione intorno alla cappa di aspirazione. Questa aggiunta è funzionale, in parte a simulare il condotto in cui viene raccolta l'aria aspirata, che non viene descritto nelle simulazioni perché non sarebbe di alcuna utilità, ma soprattutto è utile a fornire un volume che raccolga l'inquinante catturato prima di essere sottratto dal dominio. Infatti la cappa d'aspirazione è simulata dal codice come una superficie che sottrae al dominio di calcolo una determinata quantità di aria, ed è quindi necessario un piccolo volume in cui effettuare le misurazioni sul tracciante aspirato, prima che questo venga definitivamente rimosso. Questa modifica della cappa aspirante non ha compromesso in alcun modo i risultati ottenuti, infatti non si registrano variazioni degne di nota tra le portate di CO aspirate in presenza della cornice e quelle in cui è assente.

Sono state poi effettuate ulteriori approssimazioni con lo scopo di ridurre le dimensioni totali del dominio da simulare; semplificazioni riguardanti aree non necessarie e ininfluenti ai fini del calcolo dell'efficienza. Sono stati quindi eliminati sia i tubi che raccoglievano i fumi esausti, sia quelli che convogliano l'aria di mandata, inoltre lo spazio dietro l'elemento di spinta è stato ridotto al minimo. Al contrario sono state mantenute le aree vuote dietro la cappa di aspirazione, intorno ai lati e sopra la vasca, per fare in modo che si sviluppassero bene i ricircoli e i richiami d'aria indotti dal sistema *push-pull*.

3.4 Simulazioni preliminari

Prima di iniziare la convalida vera e propria, si sono indagati alcuni aspetti considerati preliminari. È infatti utile capire il tempo di cui necessita il sistema per arrivare a regime, i tempi macchina necessari alle simulazioni e verificare alcune delle approssimazioni fatte per adattare il caso sperimentale alla simulazione tramite FDS.

3.4.1 Impostazione

In queste prove preliminari, il cui unico obiettivo è quello di trarre delle indicazioni utili al resto del lavoro, verranno privilegiati tempi di simulazione brevi e domini di calcolo ridotti rispetto alla precisione e all'accuratezza dei risultati, che caratterizzerà le simulazioni successive.

3.4.1.1 *Mesh*

Il dominio di calcolo è caratterizzato da una base di 2.40 [m] lungo l'asse *x*, larga 2 [m] sull'asse *y*, e da un'altezza di 0.90 [m], asse *z*.

Le *mesh*, uniforme su tutto il volume, è costituita da celle cubiche con lato di 0.02 [m]. In questa fase si è infatti preferito non privilegiare nessuna zona, non avendo ancora alcun tipo di sensibilità riguardo al problema.

Le pareti del dominio sono aperte, in modo tale che il programma possa richiamare aria, qualora necessario, ed aggiustare i bilanci di massa. Infatti, data la sproporzione tra la portata di aria immessa nel dominio, tramite il getto di spinta, e quella aspirata dalla cappa, risulta fondamentale che vi sia anche un flusso d'aria dall'esterno del dominio.

3.4.1.2 Vasca di trattamento

La vasca è stata posta al centro del dominio, lasciando 0.16 [m] vuoti ai suoi lati e dietro il dispositivo di spinta e 0.34 [m] tra la cappa di aspirazione e la fine del dominio. Consci del fatto che tale impostazione degli spazi non permette un completo sviluppo della fluidodinamica attorno alla vasca di trattamento, è stata comunque ritenuta accettabile in questa fase, tale approssimazione.

In linea con quanto detto sopra, l'altezza della vasca è stata ridotta a 0.12 [m], per lasciare più spazio sopra la vasca, zona cruciale dove si sviluppa il problema fluidodinamico vero e proprio.
La vasca risulta definita come ostacolo nel file di input FDS, tramite un sistema di coordinate cartesiane:

&OBST XB= 0.16, 2.04, -0.84, 0.84, 0.00, 0.12 (49)

In questa stringa di codice i numeri indicano le coppie di coordinate lungo i tre assi, rispettivamente *x y* e *z*, entro i quali è definita la vasca. Comprendere come FDS individui i punti nello spazio risulta utile per poter valutare il posizionamento dei sensori di velocità utilizzati in seguito.

3.4.1.3 Ventilazione

Per quanto riguarda la ventilazione, alla cappa di aspirazione sono stati assegnati gli stessi valori utilizzati in fase sperimentale da Marzal *et al* [4], mentre il getto di spinta dal tubo forato è stato sostituito, come già spiegato in precedenza, con la lama d'aria alta 0.08 [m], e caratterizzata dalle velocità corrette riportate in *tabella 5*.
Va sottolineato che il *push-pull* viene avviato con una rampa, che ne porta le velocità da zero fino al valore impostato in qualche secondo; procedura utile a migliorare lo sviluppo dei gradienti di velocità e quindi dei risultati.

3.4.2 Tempistiche

Per prima cosa si sono indagati i tempi richiesti dal *push-pull* per arrivare a regime, dal momento che l'efficienza andrà valutata proprio in tali condizioni. In questo lavoro di tesi vengono quindi trascurati i transitori di accensione e spegnimento del sistema di ventilazione, che sono da considerarsi condizioni particolari di durata intrinsecamente breve e quindi di importanza secondaria.

Le valutazioni preliminari qui descritte sono basate sull'osservazione dell'andamento della componente *x* della velocità in diversi punti posti sopra la vasca, evidenziati in Figura 29.

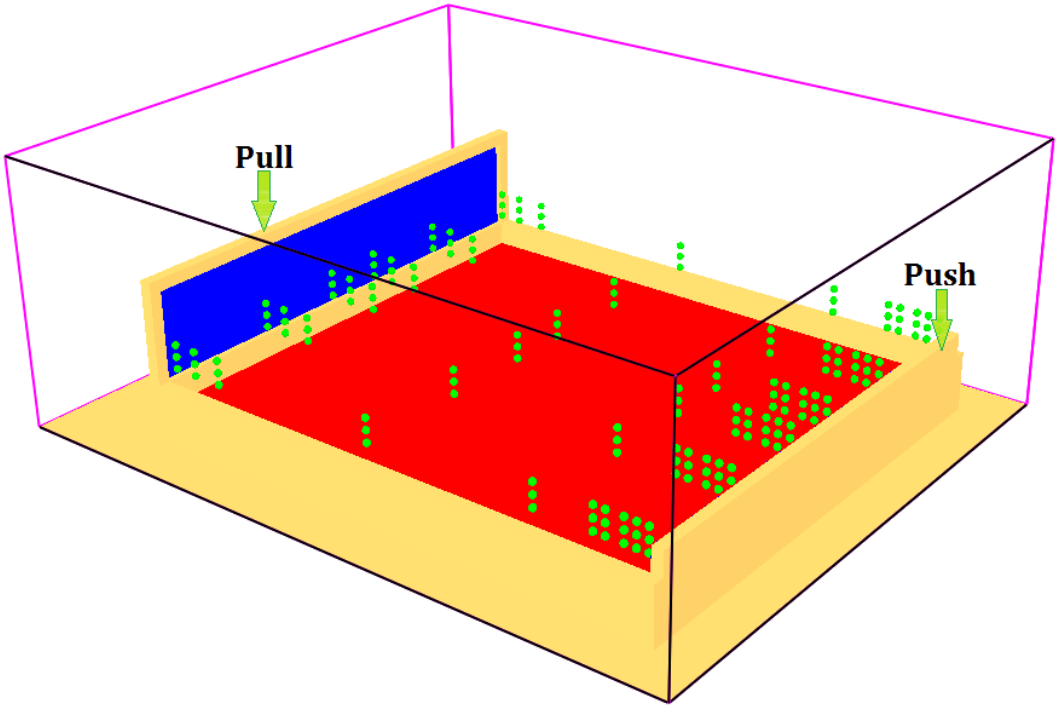


Figura 29 - Posizione dei sensori di velocità posti sopra la vasca

In particolare, poiché il codice di calcolo lo consente, sono stati utilizzati soprattutto valori della componente di velocità diretta nello stesso verso del flusso d'aria che parte dal *push* ed arriva al *pull*, ovvero lungo l'asse *x*. È quest'ultima infatti la componente che ci interessa, in quanto responsabile del trasporto dell'inquinante dalla zona di emissione alla cappa di estrazione.

Il sistema descritto è stato dunque simulato per 120 [s], imponendo il salvataggio delle informazioni di interesse ogni decimo di secondo e registrando i profili di velocità in diversi punti della vasca. Il tempo impiegato, per tale simulazione, è dell'ordine delle due ore, con un computer con processore da 4 core.

Per quanto riguarda l'arrivo a regime del sistema riportiamo, in Figura 30 l'andamento della *u-velocity*, ossia la componente di velocità diretta come l'asse *x*, relativa a due sensori: uno posto a 10 [cm] dall'ugello, a 2 [cm] dal bordo della vasca ed ad un'altezza di 24 [cm], l'altro a 10 [cm] dalla cappa, a 2 [cm] dal bordo e sempre ad un'altezza di 24 [cm]:

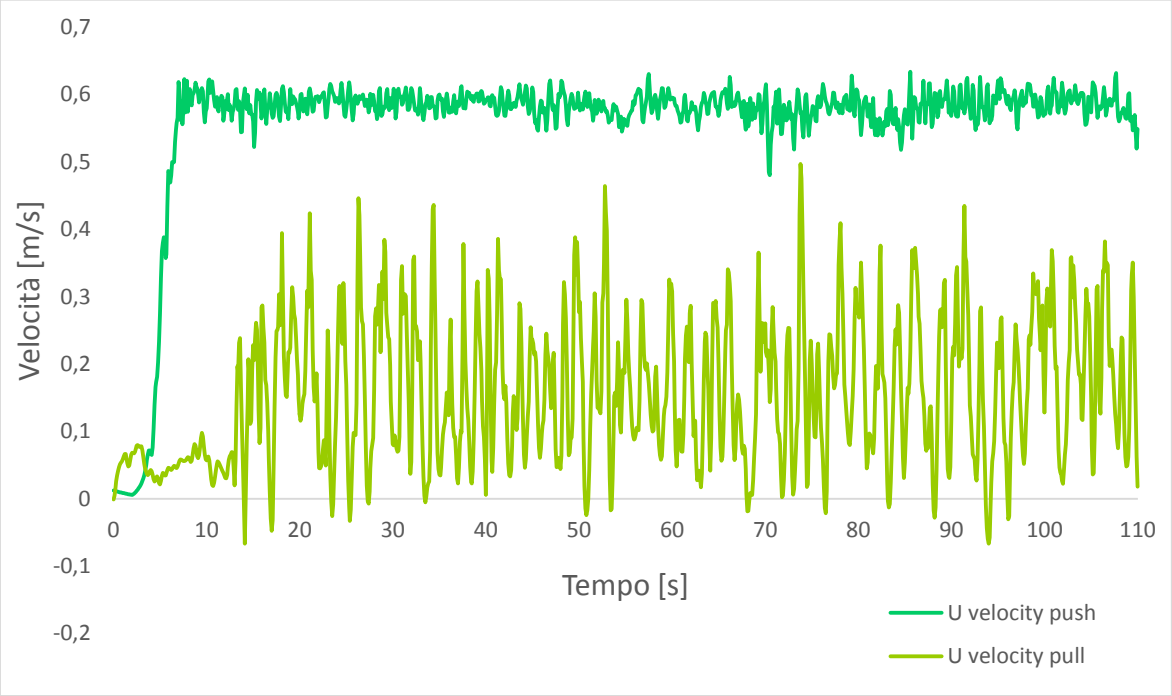


Figura 30 – Andamento della u-velocity, componente della velocità diretta lungo l'asse x. Gli andamenti sono relativi ai sensori posti nei punti (0.30, 0.78, 0.24) e (1.80, 0.78, 0.24)

Si nota immediatamente come il sistema vada a regime in maniera molto rapida e, considerato che la rampa di avviamento impiega 5 [s] ad inizializzare il *push-pull*, possiamo dire che ne servono solo altri dieci affinché il sistemi arrivi a lavorare a regime.

In posizioni diverse, pur variando la velocità in valore assoluto e la variabilità del profilo, non varia il tempo per arrivare a regime, che si mantiene molto breve, come si vede in Figura 31 per cinque posizioni diverse:

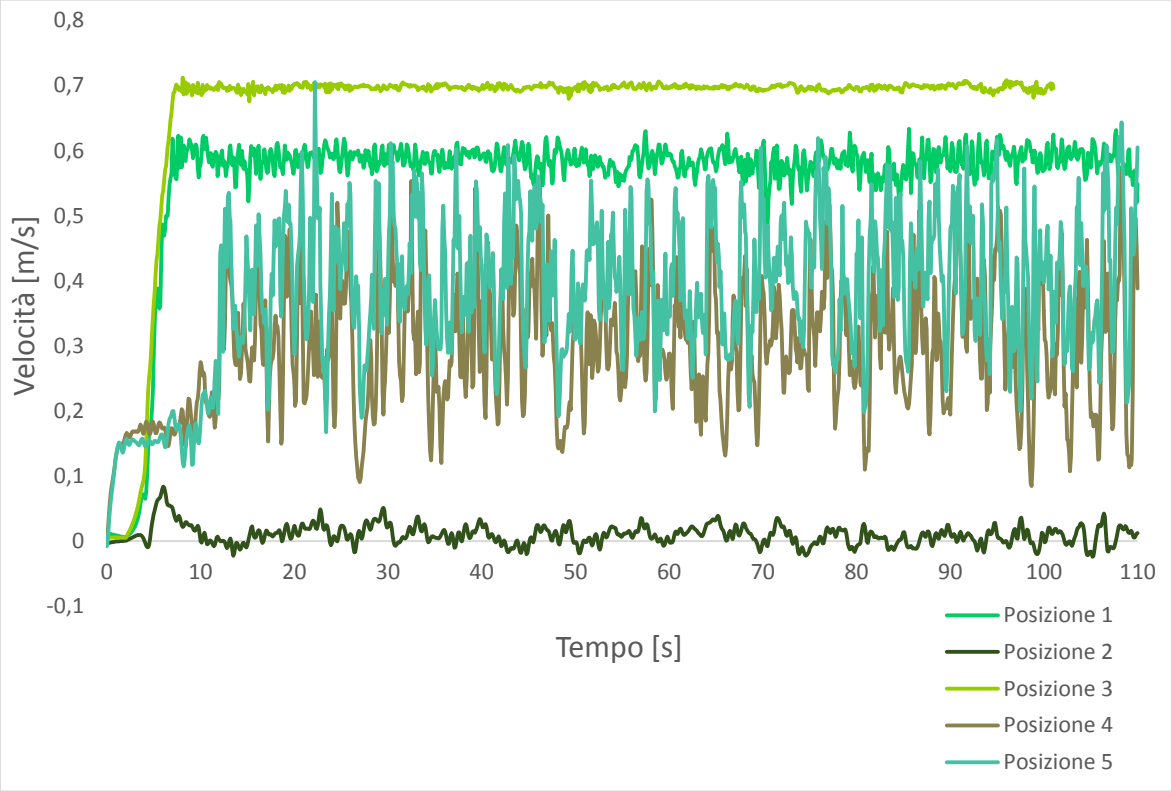


Figura 31 - Andamento della velocità in tre posizioni diverse, rispettivamente: (0.30, 0.78, 0.24), (0.30, 0.78, 0.32). (0.30, 0.40, 0.24), (1.80, 0.78, 0.24) e (1.80, 0.40, 0.24),

3.4.2.1 Tempistiche con celle più piccole

Sono state ripetute le stesse simulazioni utilizzando una *mesh* più fine, con celle cubiche di 1 [cm], in modo tale da accertarsi che la velocità con cui il processo andava a regime non fosse legata ad una dimensione eccessiva delle celle.

Dalla Figura 32 e dalla Figura 33 è chiaro che le dimensioni della *mesh*, pur portando a valori assoluti leggermente diversi, non hanno alcuna influenza sul tempo impiegato dal *push-pull* a stabilizzarsi:

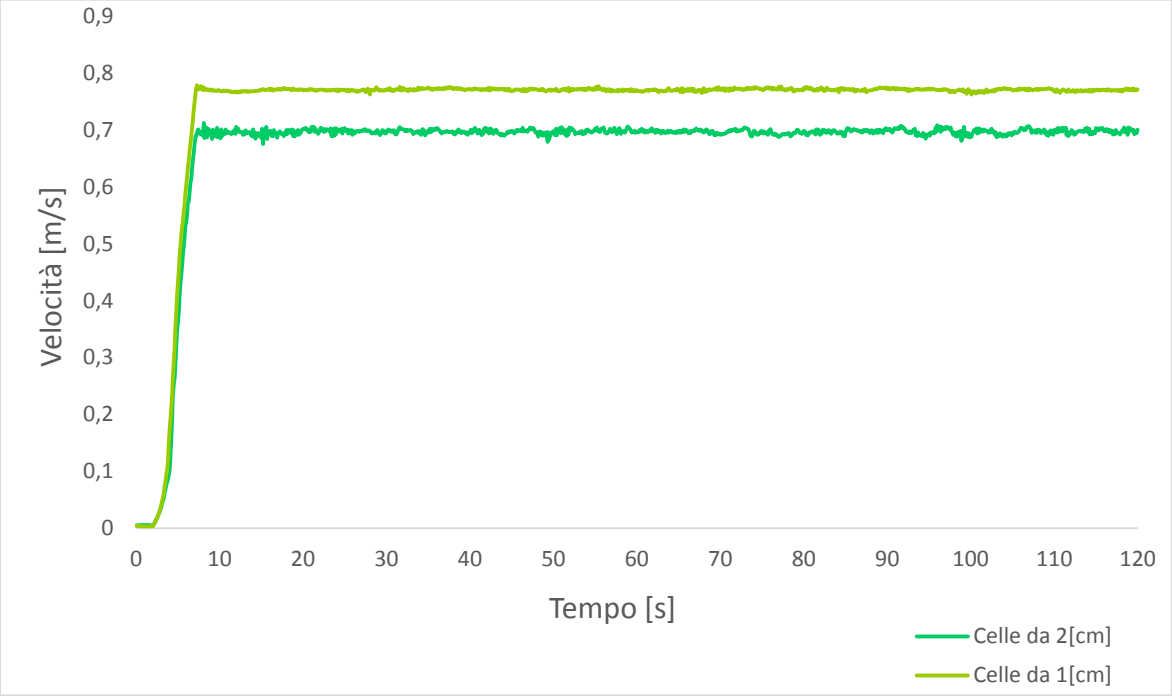


Figura 32 - Profili della *u-velocity* relativi al sensore posto in (0.30, 0.40, 0.24), cioè vicino agli ugelli

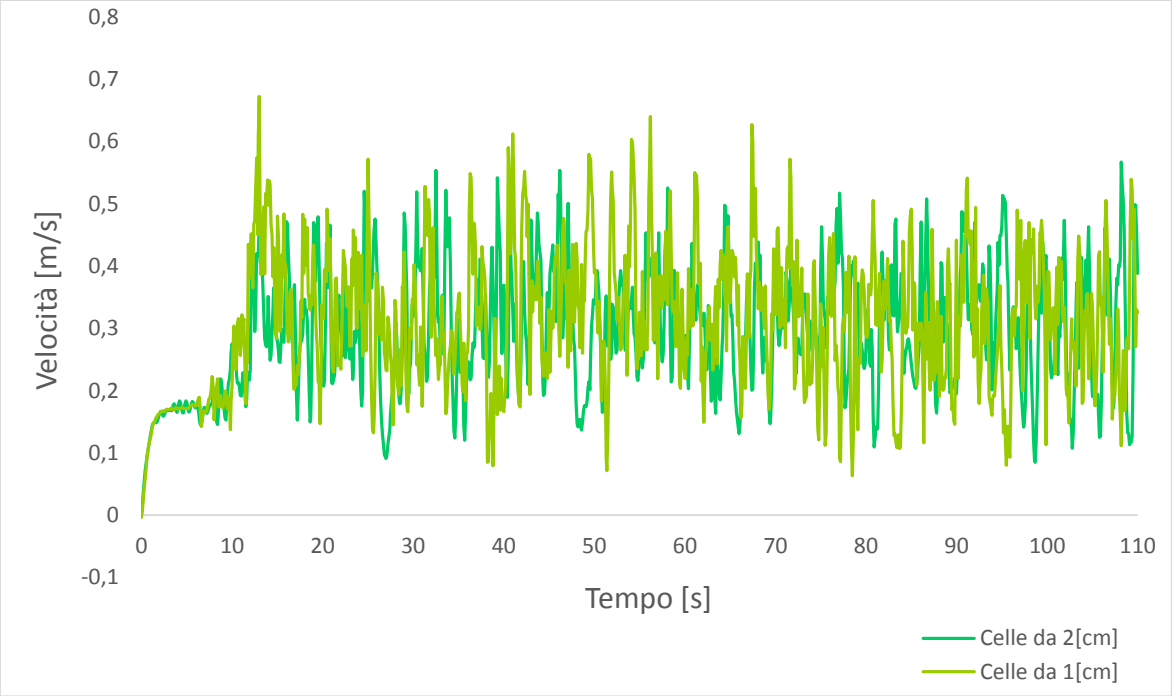


Figura 33 – Profili della *u-velocity* relativi al sensore posto in (1.80, 0.40, 0.28), quindi vicino alla cappa

Si segnala che il tempo necessario alla simulazione, decisamente più alto rispetto al caso precedente, si aggira attorno alle 24 ore con grigliatura più fitta.

3.4.3 Introduzione dell'inquinante

Il passo successivo è rappresentato dall'introduzione dell'inquinante nella vasca di trattamento. Non era infatti possibile procedere senza prima accertarsi della coerenza tra la quantità di tracciante introdotto e aspirato, ossia senza una verifica, del rispetto del bilancio di massa sul CO. A tal proposito si segnalano alcuni problemi delle versioni di FDS precedenti alla 6.1.0 nella gestione di portate molto basse, quali sono quelle dell'inquinante nel nostro dominio. Utilizzando vecchie versioni del *software*, infatti, i bilanci non si chiudevano in modo adeguato ed è stato facile accorgersene perché le efficienze di captazione superavano il 100%.

3.4.3.1 Portata tracciante

La portata di esafluoruro di zolfo mista ad aria, introdotta nei vari esperimenti in vasca, è di 20 [L/min], che corrispondono a $3.33*10^{-4}$ [m^3/s]. Poiché nell'articolo la concentrazione di SF_6 non viene specificata, abbiamo assunto che tutto quanto introdotto in vasca sia tracciante. Questa assunzione non ha dato grossi problemi perché il CO ha peso molecolare praticamente identico a quello dell'aria e quindi, non risentendo di effetti gravitazionali, non c'è il rischio che alteri le velocità di risalita rispetto a quelle sperimentali. Inoltre, dal momento che l'efficienza è calcolata come rapporto tra quanto introdotto e quanto catturato, l'introduzione di una quantità di inquinante maggiore può solo portare ad una perdita di CO maggiore, ed è quindi da considerarsi una scelta conservativa.

Il CO viene introdotto in vasca a 50 [°C] e, con un densità pari a 1.056 [kg/m^3] a tale temperatura, la portata massica risulta pari a $3.52*10^{-4}$ [kg/s].
Così come per il *push-pull*, anche l'inquinante è stato introdotto attraverso una rampa, che porta a regime il flusso in 5 [s]. L'introduzione del CO è stata inizializzata dopo 20 [s] di simulazione, ossia 10 [s] dopo che il *push-pull* risulta a regime, per essere certi di non influenzarne il comportamento.

3.4.3.2 Portata aspirata a regime

L'introduzione del CO ha permesso di valutare anzitutto i tempi per portare l'aspirazione dell'inquinante a regime, come fatto per la ventilazione.

L'analisi, sia per celle da 2 [cm] che per celle da 1 [cm] ha portato agli andamenti, visibili in Figura 34, del tracciante aspirato.

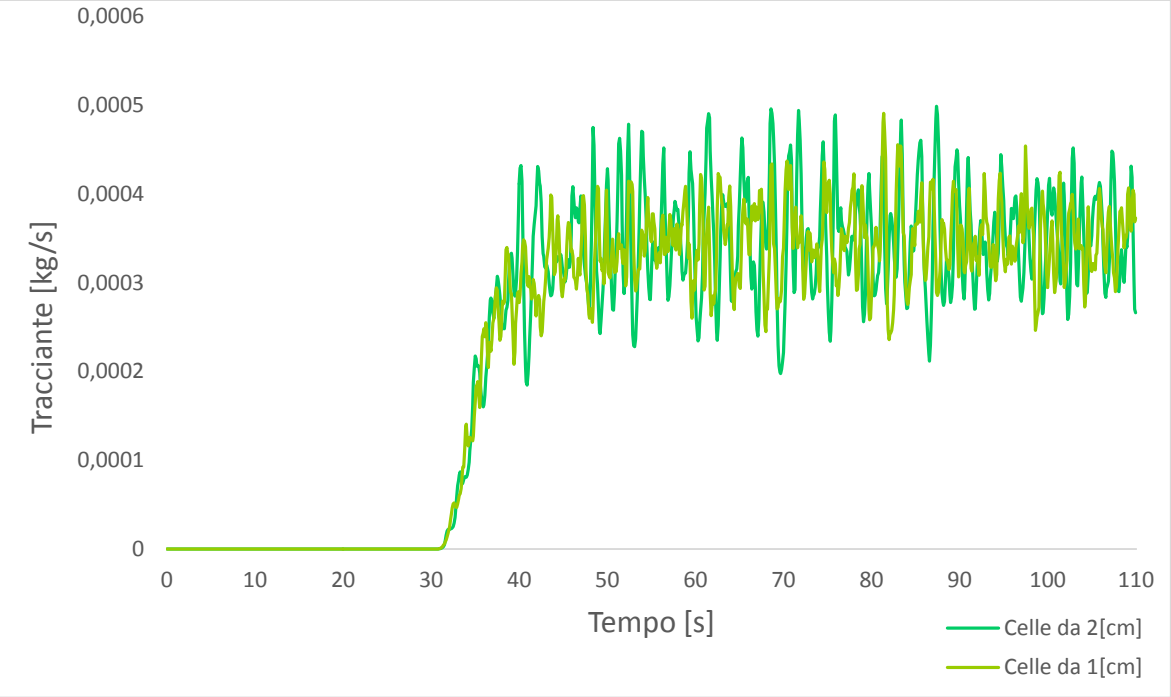


Figura 34 – Profili dell'inquinante aspirato dalla cappa per simulazioni con diverso passo di griglia

Appare ragionevole considerare l'aspirazione di inquinante a regime da 50 [s] in poi. Considerato che l'introduzione del tracciante inizia dopo 20 [s], il tempo che è necessario lasciar passare dall'introduzione del CO prima di andare a valutare l'efficienza si aggira attorno ai 20 [s].

Dalla Figura 34 emerge anche un netto miglioramento nel passaggio dalle celle di 2 [cm] a quelle più piccole. Infatti il profilo del tracciante aspirato appare più "regolare" e concentrato attorno al valor medio.

3.4.3.3 Bilancio sul monossido di carbonio

Facendo una media del CO aspirato sugli ultimi 30 [s] di simulazione, si ottiene un valore pari a $3.44*10^{-4}$ [kg/s] e, avendone introdotto $3.52*10^{-4}$ [kg/s], l'efficienza risulta del 97% circa. Questo valore è molto simile al 98% ottenuto nelle prove sperimentali da Marzal *et al.* [6]. I valori ottenuti sono ragionevoli, ma è comunque utile procedere alla verifica del bilancio sul tracciante. Definendo il residuo come:

$$\text{Residuo} = CO_{IN} - (CO_{aspirato} + CO_{perso\ dalle\ pareti\ del\ dominio}) \qquad (50)$$

Dove:

- CO_{IN} è la portata di tracciante introdotto dalla superficie della vasca in [kg/s]
- $CO_{aspirato}$ è la portata dell'inquinante catturato dalla cappa di aspirazione, in [kg/s]
- $CO_{perso\ dalle\ pareti\ del\ dominio}$ è la portata di monossido di carbonio perso attraverso le partei del dominio, sempre in [kg/s].

È necessario che il valore del residuo sia prossimo allo zero, o di almeno un ordine di grandezza inferiore alla portata di tracciante introdotta e aspirata, in questo modo viene verificata la chiusura del bilancio materiale su tutto il dominio. Nel nostro caso la grandezza di riferimento è la portata del CO, che è dell'ordine dei 10^{-4}, mentre il valor medio del residuo è $2.51*10^{-5}$, per cui il bilancio si può considerare con buona approssimazione rispettato. Tale controllo sulla chiusura del bilancio del tracciante sarà effettuato per ogni prova ma non verrà riportato, se non in casi particolari o qualora non risultasse soddisfatto.

3.4.4 Influenza della posizione del getto di spinta

Stabilite le tempistiche, si è voluti andare a verificare un'ipotesi fatta all'inizio del lavoro. Nel descrivere il getto come una lama d'aria alta 0.08 [m] anziché come un flauto forato, si è infatti imposta una portata d'aria più alta, perché la velocità del getto non è stata scalata sulla variazione dell'area dell'ugello, ma sulla condizione di uniformità del flusso. La portata immessa è quindi quella che si avrebbe dopo aver percorso 12 [cm], distanza dopo la quale il getto del flauto forato risulta uniforme e ben sviluppato. Tale portata è composta in parte dal getto, in parte dall'aria inglobata nel percorrere i 12 [cm]. Questo significa che la portata d'aria finale che arriva in cappa sarà più alta del dovuto, perché i primi 12 [cm] della vasca, dal punto di vista dell'entrainment vengono così considerati due volte. Si è dunque simulato

un caso del tutto analogo ai precedenti con un'unica differenza: la vasca è stata accorciata di 12 [cm]. Dal momento che sono cambiate le dimensioni della vasca, il confronto dei profili di velocità non avrebbe alcuna logica, per cui si andranno a confrontare le efficienze. Questo ha senso, dal momento che, se la portata del getto che arriva in cappa risultasse molto più alta di quella preventivata parte di questa inevitabilmente sfuggirebbe, con inevitabili conseguenze sull'efficienza di cattura dell'inquinante. FDS infatti descrive la cappa aspirante come un muro attraverso il quale viene estratta dal dominio l'esatta quantità specificata, nulla di più e nulla di meno.

In Tabella 1 vengono messi a confronto i risultati ottenuti simulando i tre casi sperimentali oggetto della convalida con gli stessi casi caratterizzati però dalla vasca più corta. Chiamando semplicemente "caso" i casi sperimentali corretti e "caso-12" quelli caratterizzati dalla vasca più corta:

Tabella 6 – Confronto tra casi con la vasca lunga 1.80 [m] e con la vasca accorciata a 1.68 [m], denominati "Caso-12"

Caso	Lunghezza vasca [m]	Velocità getto [m/s]	Efficienza [%]
Caso 1 Caso-12 1	1.80 1.68	0.828 0.828	97.73 98.00
Caso 2 Caso-12 2	1.80 1.68	1.247 1.247	90.91 91.02
Caso 3 Caso-12 3	1.80 1.68	1.664 1.664	77.27 77.43

Sebbene si noti un lieve miglioramento questo non è considerato significativo non solo per la sua bassa entità, ma anche per un altro motivo. L'incremento potrebbe essere dovuto anche al fatto che, riducendo la lunghezza della vasca, si è di fatto ridotta la zona dove gli inquinanti risentono meno del campo di moto creato dalla ventilazione, cioè la zona dove è più facile che si perda dell'inquinante. Inoltre, non volendo alterare le velocità di immissione del tracciante, a seguito della riduzione della superficie è stato necessario ridurne la portata totale, riducendo con essa anche la quantità che può sfuggire. Dalle considerazioni fatte possiamo quindi affermare che l'ipotesi assunta a priori all'inizio del lavoro risulta giustificata e verificata.

3.5 Simmetria del dominio computazionale

Le prove di simmetria sono state utili per verificare la possibilità di dimezzare il dominio di calcolo in modo tale da tentare di ridurre i tempi di calcolo. Questo passaggio è stato fondamentale per poter allargare successivamente il dominio per la convalida finale.
I casi considerati presentano infatti un'evidente simmetria lungo l'asse x, che abbiamo posto per praticità al centro della vasca, in modo tale da tagliarla in due metà perfettamente simmetriche.

3.5.1 Ventilazione senza inquinante

Per prima cosa si sono eseguite delle simulazioni del *push-pull* senza l'introduzione di inquinante, per capire se la ventilazione simulata in tutta la sua estensione fosse comparabile a quella simulata per metà tramite simmetria.
La *mesh* utilizzata per queste prove è la stessa *mesh* a cubetti di 2 [cm] usata nei casi precedenti e il dominio è stato spezzato lungo l'asse di simmetria della vasca. Confrontando i profili della componente di velocità diretta come l'asse di simmetria della vasca in diversi punti si sono ottenute la Figura 35 e Figura 36:

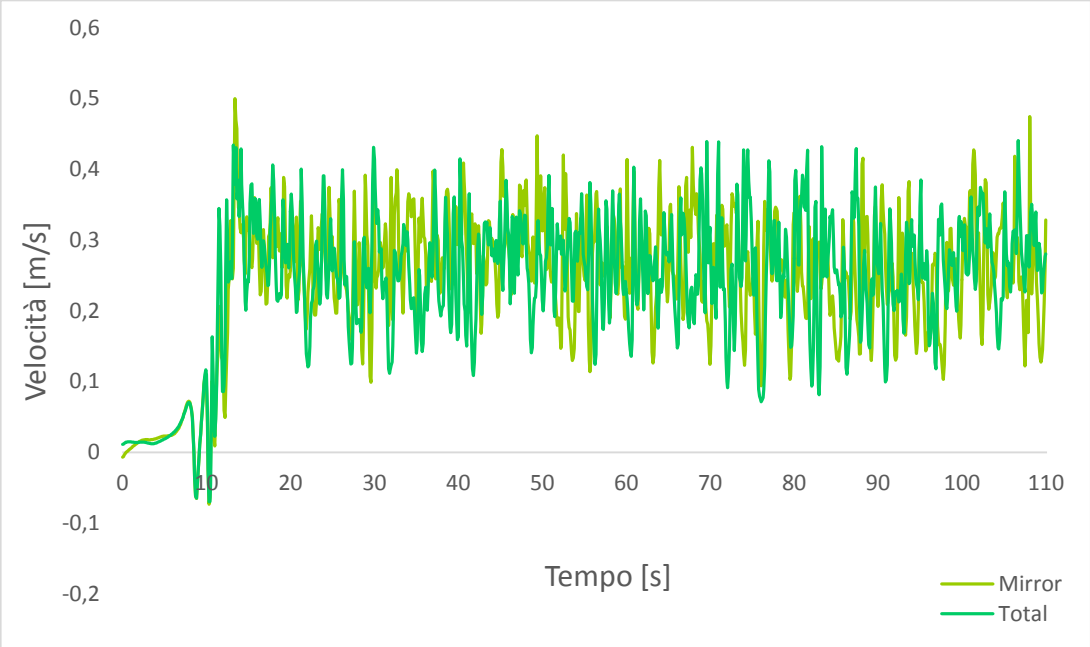


Figura 35 - Andamenti nel punto (1.20, 0.78, 0.24). "Total" indica la simulazione di tutto il dominio, "Mirror" della sua metà

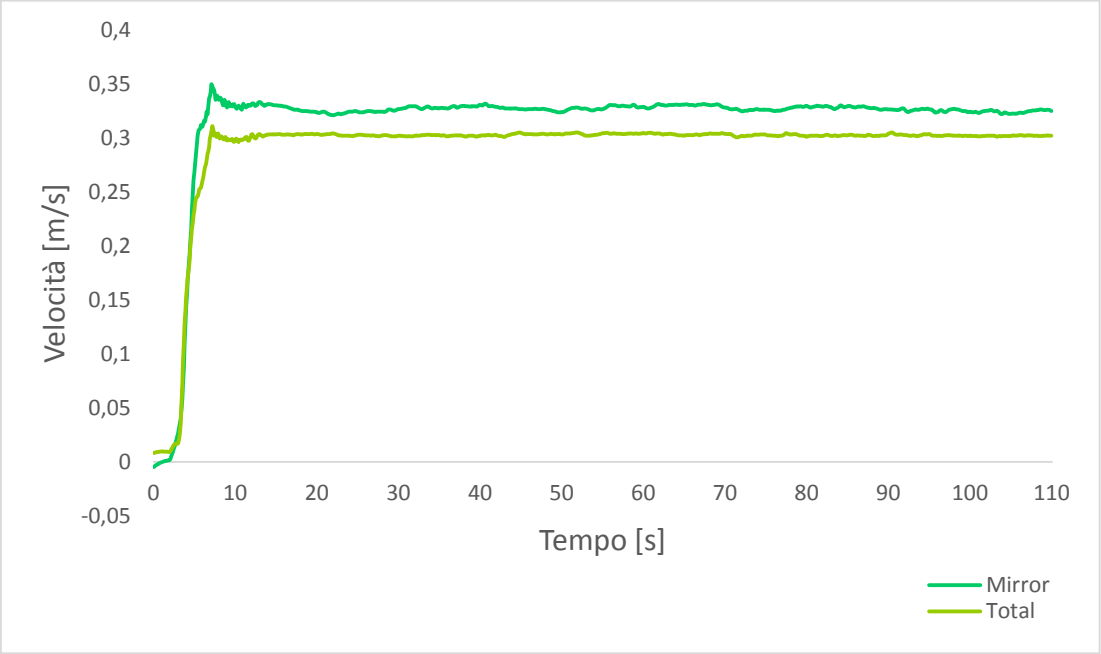


Figura 36 - Andamenti nel punto (0.26, 0.10, 0.28) “Total” indica la simulazione di tutto il dominio, “Mirror” della sua metà. In numero dopo il nome del caso indica il passo di griglia utilizzato

Dalle Figura 35 e Figura 36 non appare uno scostamento significativo delle velocità. Questo risulta vero anche per tutti gli altri profili controllati. Si sono infatti valutate le velocità in molti punti, distribuiti a file dirette come l’asse di simmetria e posti a diverse altezze rispetto alla superficie della vasca, in modo che l’analisi ricoprisse tutto il volume al di sopra di quest’ultima.

È stato quindi dedotto che il *push-pull* può essere simulato sfruttando la simmetria.

3.5.2 Ventilazione con inquinante

Accertato che il sistema di ventilazione può essere simulato sfruttando la simmetria si è poi indagata la possibilità di percorrere questa strada anche quando viene introdotto il tracciante. Reintrodotto il CO, si sono quindi simulati due casi: uno, chiamato “*total*”, rappresentante il caso per intero, l’altro con il dominio tagliato a metà grazie alla funzione *mirror* di FDS e denominato appunto “*mirror*”. Tale funzione consente, qualora sia presente un asse di simmetria, di risolvere le equazioni solo per metà dominio e di specchiarne i risultati per

l'altra metà, riducendo sensibilmente i tempi di simulazione. Si noti che in *Smokeview* viene visualizzata solo la parte di dominio risolta.

Per convalidare l'uso della simmetria si sono quindi confrontati i profili del tracciante aspirato dalla cappa:

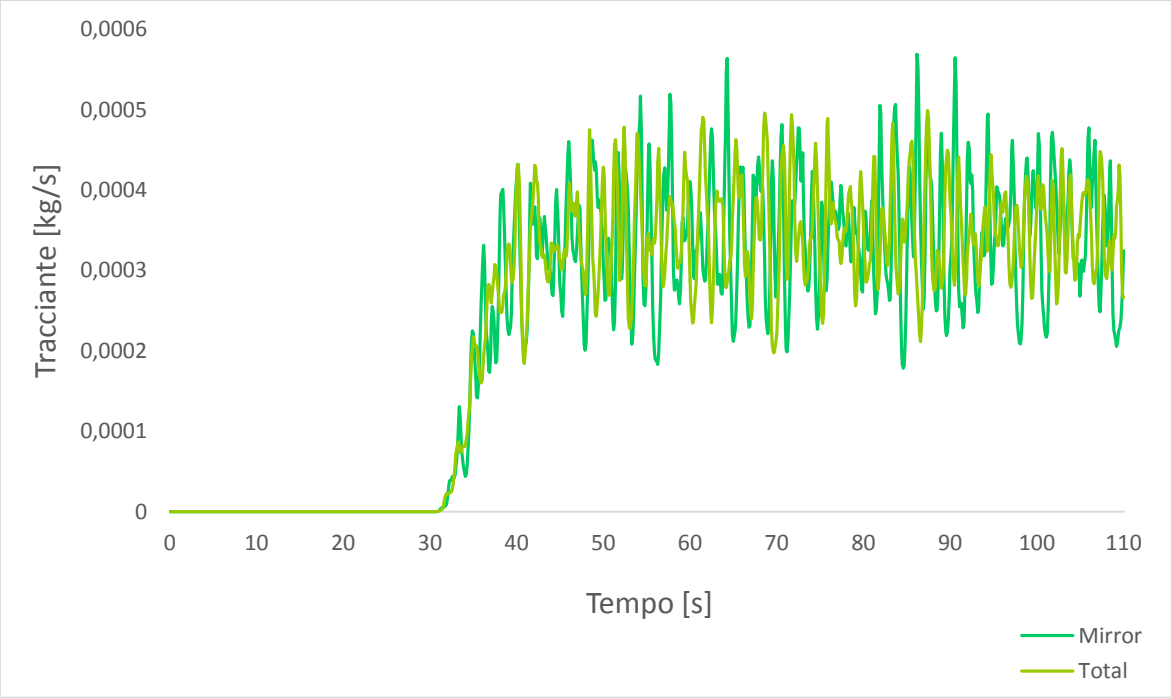


Figura 37 - Confronto tra caso simulato per intero e sfruttando la simmetria, con passo di griglia pari a 2[cm]

Come si osserva in Figura 37 i profili risultano praticamente sovrapposti, e quindi non si segnalano particolari controindicazioni all'uso della simmetria.

3.5.2.1 Variazione dimensione di cella

Prima di approvare in maniera definitiva l'uso della simmetria e di procedere alle fasi successive, si è voluto controllare che le dimensioni della *mesh* non inficiassero tale risultato. Gli stessi "*mirror*" e "*total*", caratterizzati da celle di 2 [cm], sono stati quindi simulati con *mesh* diverse e in particolare con lato della cella pari a 4 [cm] e 1 [cm].

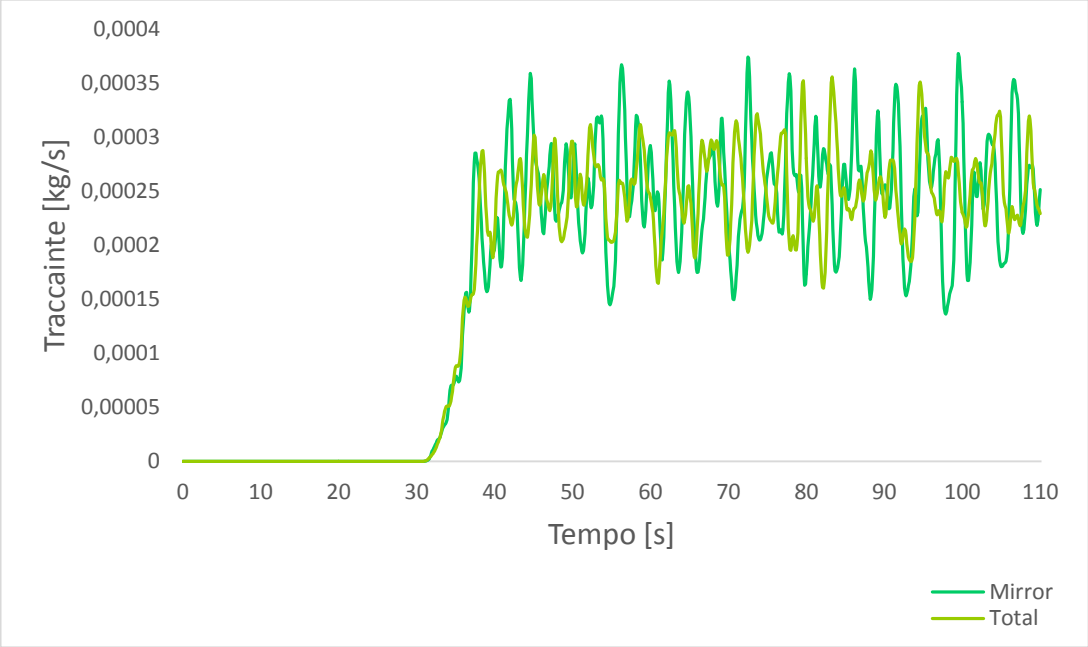


Figura 38 – Confronto tra caso simulato per intero e sfruttando la simmetria, con passo di griglia pari a 4[cm]

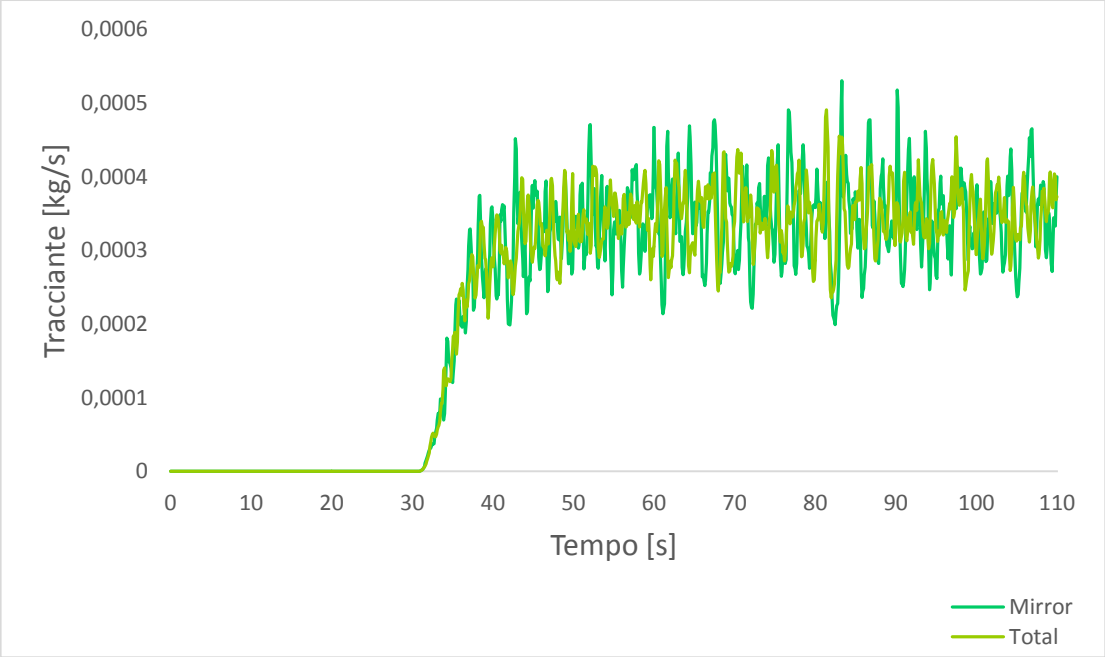


Figura 39 - Confronto tra caso simulato per intero e sfruttando la simmetria, con passo di griglia pari a 1[cm]

Dalle Figura 38 e Figura 39 si osserva che sia per *mesh* più fini che per *mesh* più grossolane l'utilizzo della simmetria non da problemi, infatti sono state riscontrate solamente oscillazioni leggermente più ampie, che però mediamente vengono compensate.
Se andiamo infatti a valutare l'efficienza, definendola come il rapporto tra la portata massica di CO introdotto ed estratto mediato sugli ultimi 30 [s] di simulazione, otteniamo variazioni trascurabili.

Da qui in avanti le simulazioni sono state condotte sfruttando le caratteristiche simmetriche dei sistemi studiati, traendo vantaggio dai tempi di calcolo ridotti, mantenendo comunque i risultati accurati e precisi.

3.6 Fase finale di convalida

Per giungere alla convalida vera e propria del modello, tenuto conto di quanto visto fino ad ora, sono stati fatti ancora alcuni passaggi.

3.6.1 Estensione del dominio

Anzitutto è stato necessario allargare il dominio di calcolo, il quale era stato ridotto ai minimi termini nelle prime fasi dello studio, in modo tale da avere tempi di calcolo più brevi. Sono state quindi fatte delle valutazioni per capire quali fossero le dimensioni adatte a descrivere con un buon grado di accuratezza il sistema.

3.6.1.1 Dimensioni

Per prima cosa si è voluto rendere la vasca più realistica, alzandola fino a 0.5 [m], e permettendo uno sviluppo fluidodinamico più corretto oltre i bordi della stessa. Ovviamente questo ha richiesto anche un incremento dell'altezza del dominio.

La cappa di aspirazione, alta 0.30 [m], arriva ad una quota di 0.90 [m], poiché davanti ad essa l'effetto dell'aspirazione viene percepito dal sistema fino ad una distanza pari quasi al doppio della sua altezza, come descritto nello stato dell'arte di paragrafo 1.2.1.

È stato necessario fornire almeno 1.00 [m] di spazio al di sopra della cappa, per favorire eventuali richiami d'aria dall'alto, il dominio totale risulta quindi alto 1.90 [m].

Considerazioni analoghe sono state fatte anche per la larghezza del dominio, intesa come la dimensione parallela ai dispositivi di spinta e aspirazione, ovvero lungo l'asse y.

Lo sviluppo laterale dei profili di velocità della cappa necessita di minore spazio rispetto a quelli frontali, tale fatto è conseguenza del rapporto tra le dimensioni della cappa stessa. Infatti, poiché la larghezza della cappa è pari a circa cinque volte la sua altezza, il richiamo d'aria risulta più importante davanti alla stessa piuttosto che ai suoi lati. Ci si è dunque accontentati di 0.50 [m] ai lati della vasca, così come anche dietro ai dispositivi di *push* e di *pull*.

3.6.1.2 Nuova *mesh*

I cambiamenti descritti sopra hanno portato ad un notevole aumento del numero di celle, con tutto ciò che ne consegue, sia dal punto di vista dell'*hardware* che dei tempi macchina. In Tabella 7 viene confrontata la *mesh* "vecchia", utilizzata per lo studio della simmetria, per la verifica dell'ipotesi di taglio di 12 [cm] della vasca e per l'analisi del tempo necessario per andare a regime, con quella "estesa", nata appunto dall'estensione del dominio.

Tabella 7 – Confronto di dimensioni tra la mesh "vecchia" e quella "estesa"

Mesh	**Lunghezza [m]**	**Larghezza effettiva [m]**	**Altezza [m]**	**Dimensione di cella [m]**	**Numero di celle [-]**
"Vecchia"	2.40	2.00	0.90	0.02	$270*10^3$
"Estesa"	2.88	2.64	1.92	0.02	$912*10^3$

In Tabella 7 la larghezza riportata è quella effettiva, che differisce però da quella simulata per via dell'uso della simmetria. I numeri di celle indicati fanno ovviamente riferimento alla larghezza simulata, non a quella totale del dominio.

La *mesh* estesa è descritta con un numero di celle più che triplicato rispetto a quella utilizzata in precedenza, con conseguente esplosione dei tempi di calcolo. Nonostante parte dell'aumento sia dovuto alla maggiorazione dell'altezza della vasca, descritta come ostacolo solido e quindi ininfluente sul peso della simulazione, rimane comunque molta differenza tra le due *mesh*. Per evitare di incappare in tempi di calcolo eccessivi, è stata dunque presa in considerazione l'ipotesi di utilizzare passi di griglia diversi all'interno del dominio, costruendo quindi delle mesh strutturate a blocchi.

L'idea è stata quella di mantenere celle di 0.02 [m] nella zona centrale, dove si trovano la vasca e il sistema di ventilazione, ovvero dove sono presenti i gradienti di velocità e concentrazione più elevati, per poi allargare la *mesh* ai bordi del dominio portando le dimensioni della cella a 0.04 [m]. Il dominio è stato quindi suddiviso come in Figura 40*:*

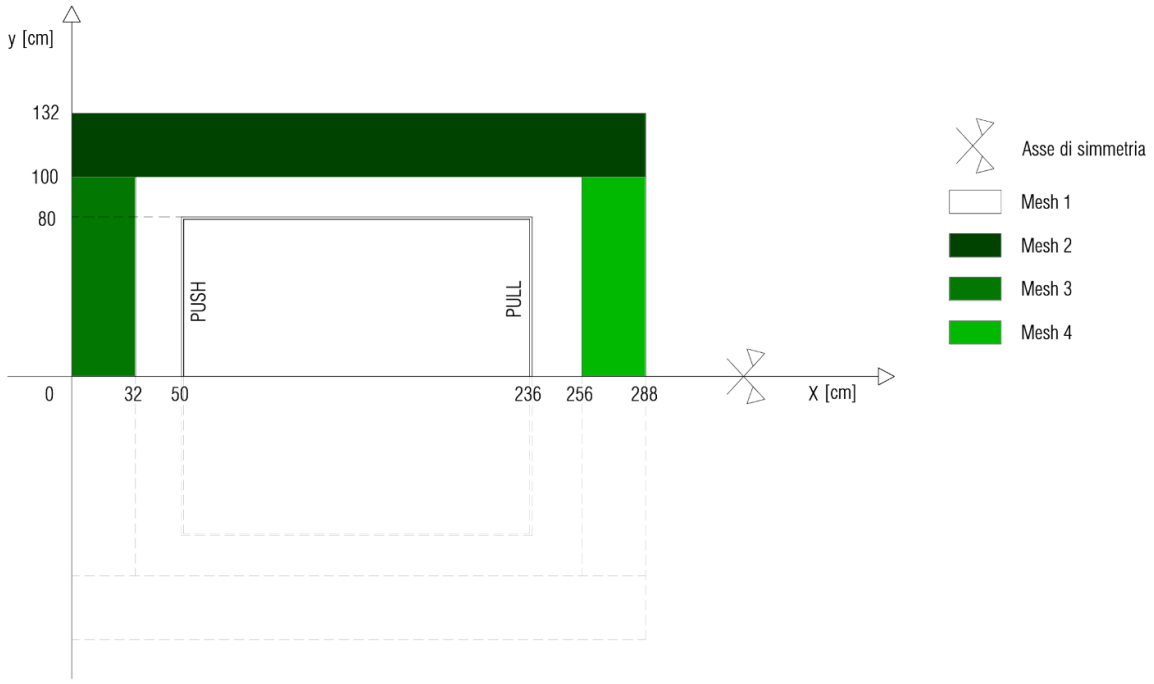


Figura 40 – Rappresentazione della parte di dominio simulata. Il dominio è suddiviso in quattro mesh, la mesh 1 ha celle da 2 [cm], mentre le altre 3 hanno celle da 4 [cm]

In questo modo si riduce notevolmente il peso della *mesh*, che risulta formata da $584*10^3$ celle, praticamente la metà rispetto al caso di grigliatura uniforme.

3.6.1.3 Confronto *mesh* e *mesh* estesa

Con la "*mesh* estesa" appena definita si sono quindi simulati i tre casi relativi alla convalida, denominati "Mesh estesa 2/4[cm]". Dal confronto con la serie di simulazioni "Mesh vecchia", relative agli stessi casi valutati con la *mesh* più piccola, si nota solo un leggero miglioramento dell'efficienza di captazione della cappa.

Il miglioramento che emerge, sebbene non eclatante, rappresenta comunque un passo verso l'ottenimento di valori il più vicino possibile a quelli sperimentali.

Dal confronto delle efficienze delle due serie di simulazioni con i dati sperimentali si ottiene il grafico di Figura 41:

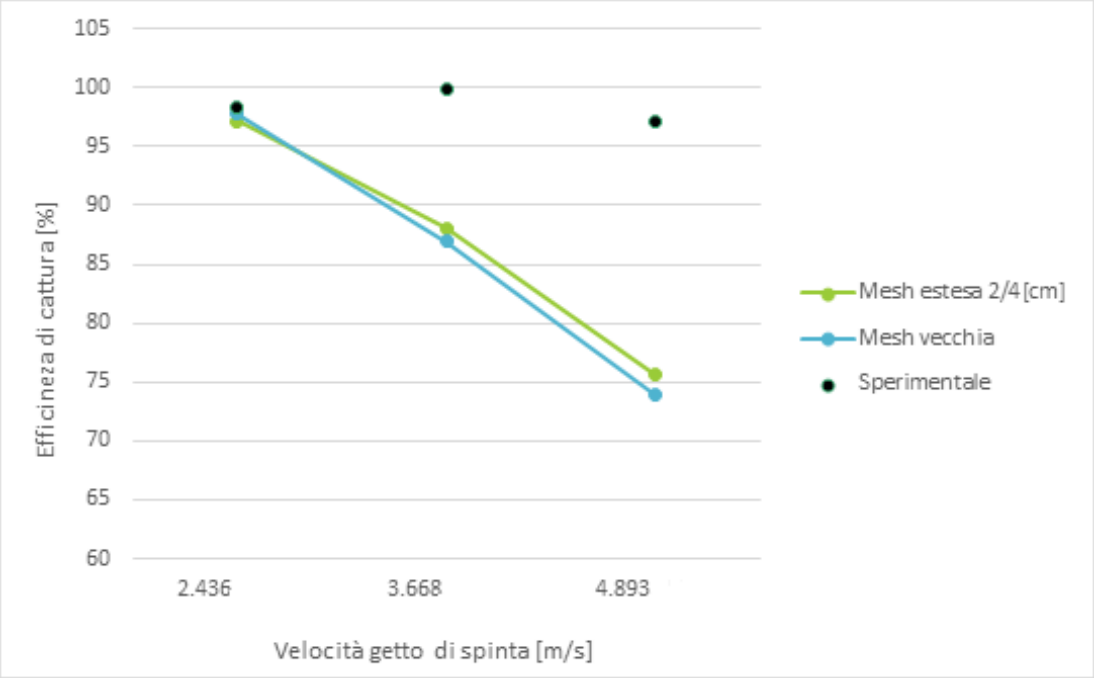


Figura 41– Confronto dell'efficienza di cattura tra i dati sperimentali e quelli ottenuti tramite FDS

Tali andamenti non possono però essere ritenuti soddisfacenti, perché c'è ancora un forte scostamento, soprattutto per quanto riguarda le velocità maggiori.

3.6.2 Indipendenza dalla *mesh*

Un ulteriore passo è stato quello di analizzare l'indipendenza dei risultati ottenuti dalla mesh. Questa fase è molto importante perché garantisce che i risultati siano slegati dal tipo e dalla dimensione della grigliatura utilizzata.

Sebbene il confronto di Figura 38 non possa essere utilizzato ai fini di dimostrare l'indipendenza della *mesh*, poiché le simulazioni confrontate hanno domini di dimensioni diverse. Risulta comunque evidente come non vi siano notevoli differenze, nonostante il suddetto cambio di dimensioni e di griglia, nei risultati tra i casi della serie "Mesh vecchia", i quali hanno *mesh* uniforme, e i casi della serie "Mesh estesa 2/4[cm]", i quali hanno una mesh divisa a zone.

Si è quindi confrontata la serie "Mesh estesa 2/4[cm]" con la serie "Mesh estesa 4/8[cm]" e la serie "Mesh estesa 1/4[cm]". In queste simulazioni la mesh è impostata allo stesso modo,

quello che cambia è la dimensione caratteristica della singola cella: 0.02/0.04 [m] per le "Mesh estesa 2/4[cm]", 0.04/0.08 [m] per le "Mesh estesa 4/8[cm]" e 0.01/0.04 per le "Mesh estesa 1/4[cm]". Da un caso all'altro sono state quindi dimezzate le dimensioni delle celle, sia per la parte centrale che per i bordi del dominio. Fa eccezione la serie "Mesh estesa 1/4[cm]" per la quale i bordi sono stati mantenuti alla stessa dimensione del caso precedente, da un lato perché queste zone risultano già descritte con sufficiente accuratezza, dall'altro perché non si voleva appesantire troppo la griglia di calcolo, già dell'ordine di qualche milione di celle.

Analizzando l'efficienza di cattura si nota come vi sia un netto miglioramento passando da una griglia con celle da 0.04/0.08 [cm] a una con celle da 0.02/0.04 [m], non solo in senso assoluto, ma anche nella curva descritta dai tre casi, che somiglia molto di più a quella sperimentale.

Dimezzando ulteriormente il passo di griglia, come si vede in Figura 42, non si ottiene un risultato altrettanto apprezzabile.

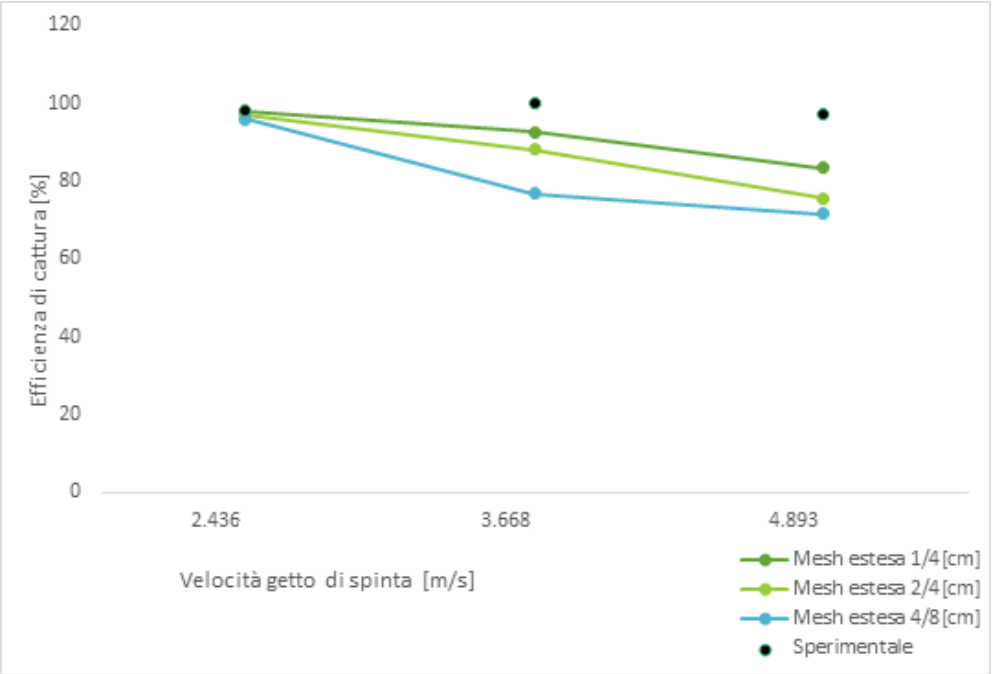


Figura 42 – Efficienza di cattura sperimentale a confronto con quella calcolata tramite FDS per diverse dimensioni di cella

Infatti, nonostante un ulteriore avvicinamento dei valori a quelli sperimentali, l'andamento "Mesh estesa 1/4 [cm]" rimane analogo al precedente, "Mesh estesa 2/4 [cm]". Questo significa che, utilizzando celle con dimensioni uguali o inferiori a 0.02/0.04 [m], i risultati non sono funzione della *mesh* utilizzata perché gli andamenti prodotti risultano simili, seppur con alcuni piccoli miglioramenti.

Infatti anche nei residui si nota, nel caso della serie "Mesh estesa 1/4 [cm]", un profilo più stretto e regolare di quelli ottenuti con le griglie più grossolane, come visibile in Figura 43:

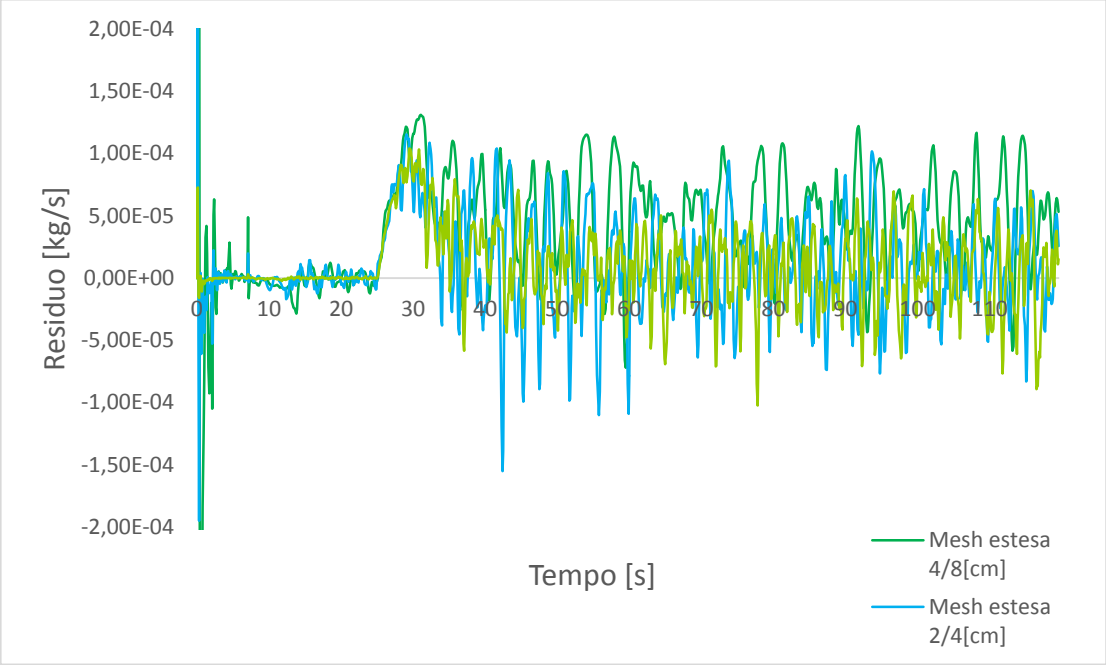


Figura 43 – Residui di tre casi analoghi ma con passo di griglia differente

3.6.3 Modifica dell'angolo di apertura del getto

3.6.3.1 Causa della perdita di efficienza

Indagando la causa dello scostamento tra i dati ottenuti e le prove sperimentali si nota che il distacco aumenta all'aumentare della velocità del getto di spinta. Questo potrebbe essere sintomo della portata della cappa di aspirazione che, mantenuta costante, all'aumentare della portata del getto di spinta non riesce ad estrarre dal dominio tutta l'aria che le arriva. Si avrebbero così delle perdite crescenti con la portata del *push* che potrebbero, almeno in parte, giustificare l'andamento delle efficienze.

Dall'osservazione dei profili di velocità si ha la conferma di quanto ipotizzato. In Figura 44 è infatti evidente come la cappa non riesca a catturare tutta l'aria, perdendone quindi buona parte. Con essa viene perso anche il CO, con relativa diminuzione dell'efficienza di cattura finale.

3.6.3.2 Riduzione della portata del getto di spinta

Durante le fasi preliminari alla convalida si era scelto come angolo di apertura del semi-getto in uscita dai fori il valore massimo di 15°. Portando però questo ad una portata eccessiva si è pensato di provare a ridurre tale angolo a 12°, valore che rientra comunque nel range consigliato [2].

Riducendo l'angolo sono ovviamente cambiate le caratteristiche del getto imposto all'ugello, che risulta quindi alto 0.06[m] e non più 0.08[m], con conseguente riduzione della portata.

Con tali impostazioni si è eseguita una nuova serie di simulazioni denominata "Mesh estesa 1/4[cm], angolo 12°", del tutto identiche a quelle della serie "Mesh estesa 1/4 [cm]", a meno del getto. Si riporta qui, in Figura 44, solo il confronto finale delle efficienze:

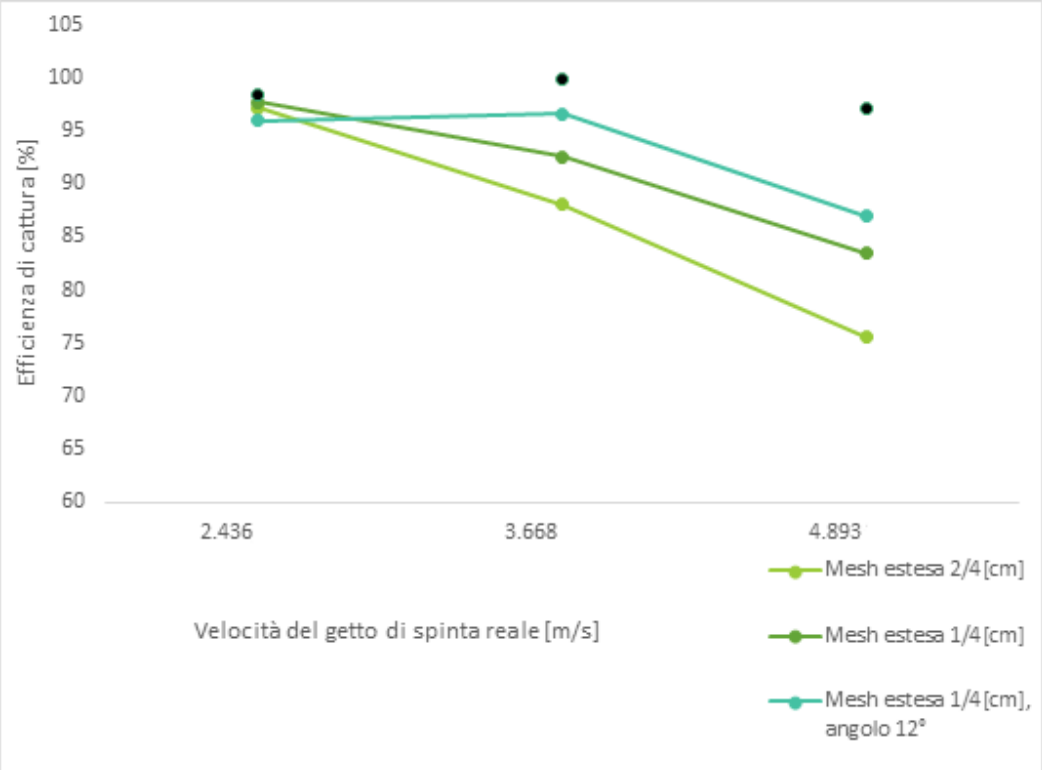


Figura 44 – Confronto efficienze di cattura al variare della velocità del getto di spinta per le varie serie di simulazioni

Quest'ultima serie di simulazioni, oltre ad essere più vicina ai dati sperimentali in valore assoluto, ha anche un andamento che meglio descrive quello delle prove sperimentali.
L'errore commesso è nel caso peggiore del 10% circa, senza nemmeno considerare l'incertezza assoluta legata alla determinazione del dato sperimentale. Ritenendo accettabile tale valore si considera il modello adeguato a descrivere la ventilazione tramite sistemi *push-pull.*

CAPITOLO 4

Risultati e discussione

4.1 Impostazione e dominio

Accertato che FDS è adatto alla simulazione di sistemi di ventilazione, è stata analizzata l'influenza di diversi parametri sull'efficienza di cattura.
Verrà utilizzata una vasca dalle dimensioni leggermente diverse rispetto a quelle che caratterizzavano il caso sperimentale della convalida, prendendo spunto dallo studio condotto da Nasso e Bonanno [12]. Trattandosi di differenze limitate e comunque non inerenti il sistema di ventilazione vero e proprio, si ritiene che queste non vadano ad inficiare i risultati ottenuti in fase di convalida.

4.1.1 Geometria

La vasca utilizzata è lunga 2 [m] e larga 4 [m] ed ha un'altezza di 0.26 [m]. La superficie della vasca è volutamente grande, sia per porsi al limiti dei valori consigliati dalle norme di buona tecnica, sia perché in talune lavorazioni si riscontrano davvero queste dimensioni, come riportato anche in un lavoro di tesi precedente [12].

Per quanto riguarda l'altezza viene fatta invece una scelta radicalmente diversa. Questa viene infatti sottodimensionata in favore della diminuzione dei volumi e dei tempi che saranno necessari alla simulazione. Tale assunzione, oltre ad essere ragionevole, è già stata verificata in fase di convalida, dove si è visto come un aumento dell'altezza della vasca non influisca

in alcun modo sulle prestazioni della stessa. Infatti, dall'osservazione degli andamenti della velocità, si è visto che al di sotto dell'altezza della superficie della vasca non si hanno grandi movimenti d'aria, i quali sono tutti concentrati al sopra della vasca.

Su tutti i lati della vasca, descritta nel file input di FDS come un parallelepipedo solido, vengono poi posti dei bordi alti 0.10 [m] e col minimo spessore possibile, pari quindi alla dimensione della cella. Al di sopra di questi, sui lati maggiori vengono quindi disposti l'ugello di spinta e la cappa di aspirazione alti, rispettivamente, 0.02 e 0.15 [m].

4.1.2 *Mesh*

La *mesh* utilizzata ha caratteristiche analoghe a quella utilizzata nell'ultima fase della convalida. La zona centrale, ovvero quella cruciale, ha infatti una grigliatura più fitta, con passo di 0.01 [m] mentre appena sopra di questa il passo viene prima allargato a 0.02 [m] e poi a 0.04 [m] nella parte più alta del dominio. Inoltre le dimensioni di cella sono state aumentate anche sotto la superficie della vasca, a causa della scarsa influenza che ha questa zona, come già sottolineato. Tale configurazione è visibile in Figura 45*:*

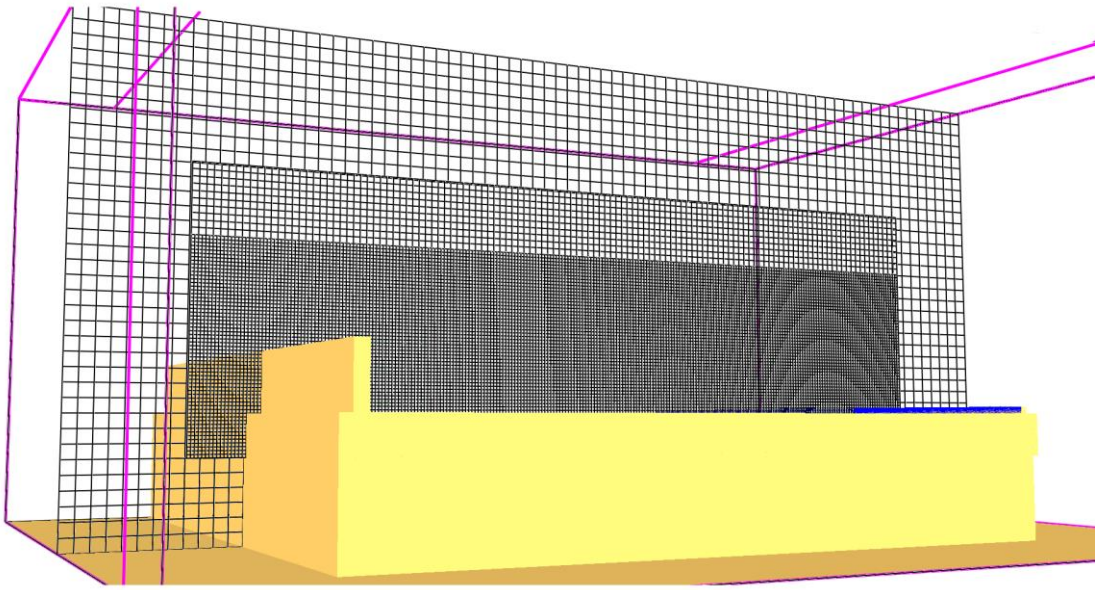


Figura 45 – Impostazione della griglia di calcolo valida per tutte le simulazioni

I bordi del dominio sono descritti tramite dimensione di cella costante e pari a 0.04 [m], così da alleggerire ulteriormente l'onere computazionale. Per informazioni più presise riguardo alla *mesh* si rimanda al file di input riportato, a titolo di esempio, in appendice.

4.1.3 Dominio

Le dimensioni del dominio di calcolo sono dettate dalle dimensioni della vasca e da considerazioni analoghe a quelle fatte in fase di convalida per stabilire lo spazio necessario attorno ad essa, in modo tale da garantire comunque una certa accuratezza nella descrizione dei fenomeni. Sono successivamente stati aggiunti 0.20 [m] circa in tutte le direzioni per sicurezza, dato lo scarso peso di questa parte aggiunta ai bordi del dominio. Questo ha portato alla creazione di un volume di calcolo lungo 3.08 [m] e largo 5.04 [m]. Nei casi in cui viene introdotta una corrente di disturbo, la lunghezza viene portata a 3.60 [m], per permettere lo sviluppo della stessa. Si noti che tali dimensioni sono state, in alcuni casi, aggiustate di qualche centimetro, affinché si verificasse l'allineamento delle celle necessario per il *software*. Nel caso si abbiano griglie diverse infatti è necessario che ai bordi si verifichi una delle condizioni di Figura 46:

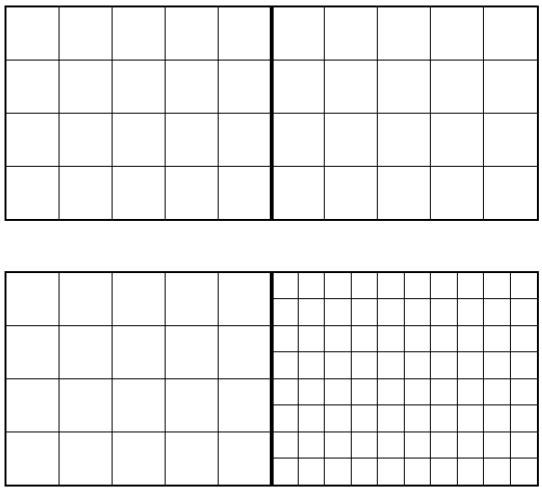


Figura 46 – Condizioni ideali tra mesh diverse

Non è invece accettabile che si verifichi una situazione come quella rappresentata in Figura 47: in questo caso infatti FDS si blocca avvisando l'utente dell'errore di allineamento tra le *mesh*.

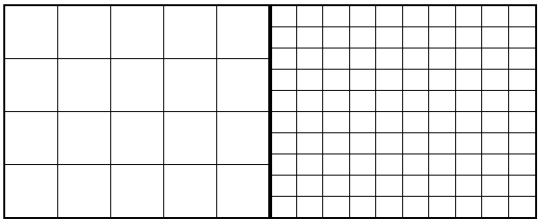


Figura 47 – Allineamento delle mesh non consentito da FDS

Si ricorda anche che, poiché si è deciso di sfruttare la simmetria, la larghezza simulata non è di 5.04 [m] ma della sua metà, ovvero 2.52 [m].
La terza dimensione del dominio, ovvero l'altezza, è stata pensata in funzione dell'ostacolo che verrà successivamnte posto nella vasca e che avrà altezza massima, sopra al pelo libero della vasca, di 0.75 [m]. A fronte di ciò, si è ritenuto adeguato imporre un dominio alto 1.44 [m] per tutte le simulazioni, tranne per quelle in cui è stata imposta la corrente di disturbo. Infatti, essendo questa corrente opposta al getto di spinta, è stato necessario aumentare l'altezza del dominio per permettere la descrizione della zona in cui si incontrano la corrente d'aria di disturbo e il getto di spinta. In questo caso l'altezza totale del dominio è stata dunque aumentata fino a 1.64 [m].
Le pareti del dominio sono state imposte come spazi aperti, in modo tale che all'interno del volume di calcolo potesse essere richiamata tutta l'aria necessaria.

4.1.4 Ostacolo

L'ostacolo è costituito da un parallelepipedo, il solido peggiore per quanto riguarda l'efficienza della ventilazione: un ostacolo sferico o triangolare, ad esempio, non creerebbe troppo fastidio, perché l'aria del *push-pull* potrebbe scivolare attorno a tale ingombro, intrinsecamente più aerodinamico.

Ovviamente di tale ostacolo è descritta solo la parte che sporge dalla superficie della vasca, perché la parte sommersa nel liquido di trattamento non influenza la ventilazione e non è quindi di nostro interesse.
Infine, per permettere l'uso della simmetria, il centro dell'ostacolo sarà sempre posto a metà della larghezza della vasca e, come quest'ultima, simulato per metà.

4.1.5 Tracciante

Come tracciante si utilizza il monossido di carbonio, per le stesse ragioni descritte nel capitolo precedente, il quale viene introdotto attraverso la superficie della vasca. Essendo questa variabile in funzione delle dimensioni dell'ostacolo, la portata di inquinante non sarà sempre uguale. Non è infatti possibile, né avrebbe senso, introdurre inquinante attraverso l'ostacolo. Quindi, volendo mantenere costante la portata massica specifica per unità di superficie pari a 0.01 [kg/s], la quantità totale di inquinante introdotto varierà in funzione delle dimensioni dell'ingombro. Tale scelta è stata fatta con l'obiettivo di mantenere costante la velocità di ingresso del CO, parametro ritenuto di importanza maggiore rispetto alla variazione della quantità totale, soprattutto in vista del calcolo dell'efficienza descritta come rapporto tra quantità introdotta ed estratta.

4.1.6 Ventilazione

Per dimensionare il *push* si è partiti dai dati provenienti dal lavoro di Nasso e Bonanno [12], ovvero un ugello a forma di fessura avente altezza 0.005 [m], larghezza 4 [m] e portata $Q_o = 0.1928$ [m^3/s].
Questi dati sono stati successivamente adattati alla dimensione della nostra *mesh*, seguendo l'equazione (1) fornita dall'ACGIH e quanto descritto in Figura 28, sfruttando l'equazione (47).
L'altezza iniziale infatti era troppo piccola, visto il passo di griglia da noi scelto, per questo motivo è stata aumentata fino ad arrivare a 0.02 [m], in modo tale da essere descritta da 2 celle. La lunghezza *x* necessaria al getto per svilupparsi, con apertura di 12°, ed arrivare ad avere la dimensione da noi stabilita è:

$$x = \frac{(0.02 - 0.05)/2}{tg(12)} = 0.0353\ [m]$$

Il nuovo valore di portata è:

$$Q_x = 0.1928 * 1.2 \sqrt{\frac{0.13 * 0.0353}{0.005} + 0.41} = 0.267\ \left[{m^3}/{s}\right]$$

L'area dell'ugello risulta:

$$A = 0.02 * 4 = 0.08\ [m^2]$$

La velocità in uscita dallo *slot* è dunque:

$$v = \frac{Q_x}{A} = 3.35\ [{m}/{s}]$$

La portata in aspirazione è invece pari a 3.048 [m^3/s], a cui corrisponde una velocità di aspirazione di 5.08 [m/s]. Tale valore di portata rispetta le linee guida dell'ACGIH, in particolare è ricavabile dall'equazione (10).

4.1.7 Analisi dei risultati

Dopo aver controllato l'andamento a regime dell'aspirazione del tracciante da parte della cappa, l'efficienza viene valutata come media sugli ultimi 30 [s] di simulazione. Tale operazione permette di ricavare un valore ragionevolmente indipendente dalle oscillazioni istantanee e rappresentante le *performance* del sistema *push-pull* per il caso considerato.

Per ogni caso vengono inoltre controllati i residui, che devono sempre essere di almeno un ordine di grandezza inferiori rispetto alle altre portate in gioco. Tale controllo sarà dato per scontato e non sarà riportato, salvo il caso in cui dia esito negativo.

4.2 Configurazioni esaminate

4.2.1 Parametri non controllabili

Nel presente lavoro vengono analizzate le prestazioni del *push-pull* al variare della larghezza e dell'altezza dell'ostacolo, che rappresenta l'ingombro del pezzo da trattare in vasca. Tali parametri, così come l'eventuale presenza di correnti d'aria di disturbo all'interno dell'ambiente di lavoro, non sono gestibili e sono quindi indipendenti dalla regolazione del *push-pull*.

Non viene invece presa in considerazione la lunghezza dell'ostacolo perché questa non influenza in maniera significativa la capacità di cattura del sistema di ventilazione [9].

Le configurazioni studiate sono quelle riassunte in Tabella 8:

Tabella 8 – Casi simulati

Nome caso	**Altezza ostacolo [m]**	**Larghezza ostacolo [m]**	**Distanza dal *push* [m]**	**Corrente di disturbo [m/s]**
h025w050d075	0.25	0.50	0.75	assente
h025w150d075	0.25	1.50	0.75	assente
h025w250d075	0.25	2.50	0.75	assente
h025w400d075	0.25	4.00	0.75	assente
h030w400d075	0.30	4.00	0.75	assente
h035w400d075	0.35	4.00	0.75	assente
h050w400d075	0.50	4.00	0.75	assente
h075w400d075	0.75	4.00	0.75	assente
h025w050d075v	0.25	0.50	0.75	0.25
h025w150d075v	0.25	1.50	0.75	0.25
h025w250d075v	0.25	2.50	0.75	0.25

Nome caso	Altezza ostacolo [m]	Larghezza ostacolo [m]	Distanza dal *push* [m]	Corrente di disturbo [m/s]
h025w400d075v	0.25	4.00	0.75	0.25
h030w400d075v	0.30	4.00	0.75	0.25
h035w400d075v	0.35	4.00	0.75	0.25
h050w400d075v	0.50	4.00	0.75	0.25
h075w400d075v	0.75	4.00	0.75	0.25

4.2.2 Parametri controllabili

Anche l'analisi dei parametri gestibili risulta molto interessante, dal momento che si tratta di modifiche che possono essere liberamente eseguite durante la fase di regolazione del sistema di ventilazione. In particolare si considerano la posizione dell'ostacolo rispetto all'ugello del getto di spinta e la riduzione della portata aspirata.

Mentre la modifica della posizione dell'ostacolo non porta altro vantaggio se non l'eventuale miglioramento delle prestazioni, la regolazione della cappa d'aspirazione verso portate più basse, comporta ovviamente anche costi operativi più bassi.

In Tabella 9 sono riportati i casi analizzati:

Tabella 9 – Casi analizzati con parametri controllabili

Nome caso	Altezza ostacolo [m]	Larghezza ostacolo [m]	Distanza dal *push* [m]	Corrente di disturbo [m/s]	Riduzione aspirazione
h025w400asp	0.25	4.00	0.75	0.25	30%
h030w400asp	0.30	4.00	0.75	0.25	30%
h035w400asp	0.35	4.00	0.75	0.25	30%
h050w400asp	0.50	4.00	0.75	0.25	30%
h025w050asp	0.25	0.50	0.75	0.25	30%

Nome caso	**Altezza ostacolo [m]**	**Larghezza ostacolo [m]**	**Distanza dal *push* [m]**	**Corrente di disturbo [m/s]**	**Riduzione aspirazione**
h025w150asp	0.25	1.50	0.75	0.25	30%
h025w250asp	0.25	2.50	0.75	0.25	30%
h025w400d040	0.25	4.00	0.40	assente	assente
h025w400d040v	0.25	4.00	0.40	0.25	assente
h025w400d040asp	0.25	4.00	0.40	0.25	30%
h025w400d110	0.25	4.00	1.10	assente	assente
h025w400d110v	0.25	4.00	1.10	0.25	assente
h025w400d110asp	0.25	4.00	1.10	0.25	30%

4.3 Parametri non controllabili

4.3.1 Influenza della larghezza

Lo studio dell'influenza della larghezza dell'ostacolo sull'efficienza di cattura, viene condotta a partire dall'ostacolo più piccolo, largo 0.50 [m], per poi arrivare ad ostacoli più grandi e larghi come tutta la vasca, cioè 4.0 [m].

I risultati ottenuti sono riassunti in Tabella 10:

Tabella 10 – Influenza della larghezza dell'ostacolo

Nome caso	Altezza ostacolo [m]	Larghezza ostacolo [m]	Distanza dal *push* [m]	Corrente di disturbo [m/s]	Efficienza [%]
h025w050d075	0.25	0.50	0.75	assente	99.66
h025w150d075	0.25	1.50	0.75	assente	98.89
h025w250d075	0.25	2.50	0.75	assente	99.01
h025w400d075	0.25	4.00	0.75	assente	98.67

Emerge dunque, oltre ad un'elevata efficienza, che la larghezza dell'ostacolo non influenza le prestazioni del sistema di ventilazione.

Nonostante il flusso del getto di spinta sia bloccato dall'ostacolo, grazie all'effetto di richiamo d'aria da parte della cappa d'aspirazione, l'aria riesce comunque a scavalcare l'ostacolo.

4.3.2 Influenza dell'altezza

Per essere sicuri che i risultati di Tabella 10 non fossero dovuti ad un'altezza modesta dell'ostacolo, sono state fatte delle simulazioni nelle quali si è aumentato proprio questo parametro, fino ad valore massimo di 0.75 [m], già considerato molto alto a fini pratici. Inoltre, per porsi nel caso peggiore, è stato preso in considerazione un ostacolo largo come l'intera vasca. Al contrario, un ostacolo caratterizzato da larghezze inferiori avrebbe potuto,

almeno in parte, essere aggirato lateralmente dal getto d'aria, vanificando così lo scopo di questa serie di simulazioni.

I risultati ottenuti sono riportati in Tabella 11:

Tabella 11 – Influenza dell'altezza dell'ostacolo

Nome caso	**Altezza ostacolo [m]**	**Larghezza ostacolo [m]**	**Distanza dal *push* [m]**	**Corrente di disturbo [m/s]**	**Efficienza [%]**
h025w400d075	0.25	4.00	0.75	assente	98.67
h030w400d075	0.30	4.00	0.75	assente	98.95
h035w400d075	0.35	4.00	0.75	assente	97.73
h050w400d075	0.50	4.00	0.75	assente	95.67
h075w400d075	0.75	4.00	0.75	assente	95.33

Si osserva che l'efficienza di cattura scende, anche se di poco, con l'altezza dell'ostacolo. Come si vede in Figura 48 infatti, l'effetto della cappa di aspirazione è così preponderante che richiama il tracciante anche da zone molto distanti dalla superficie di aspirazione.

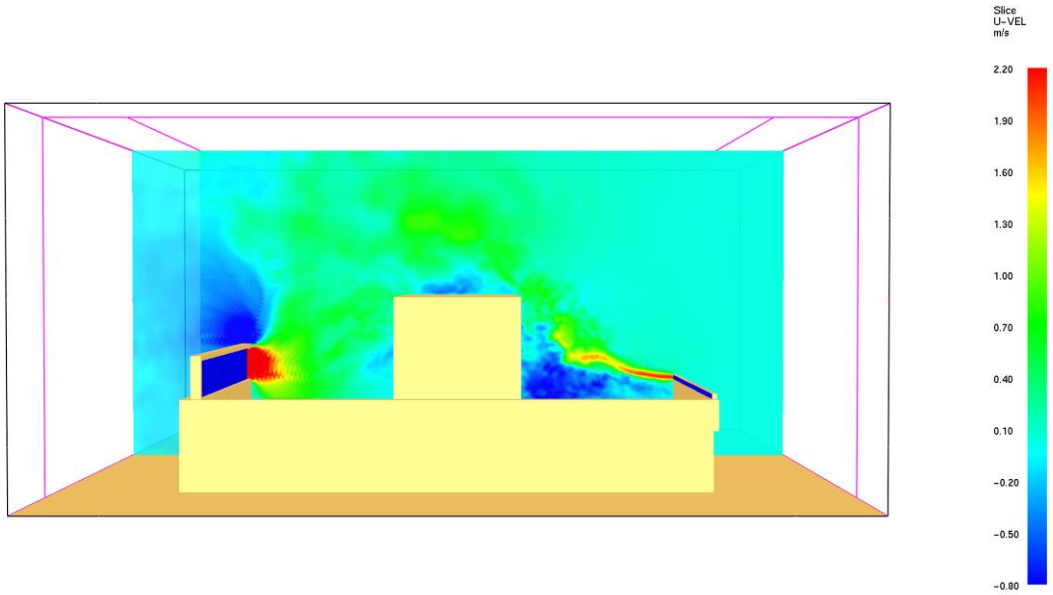
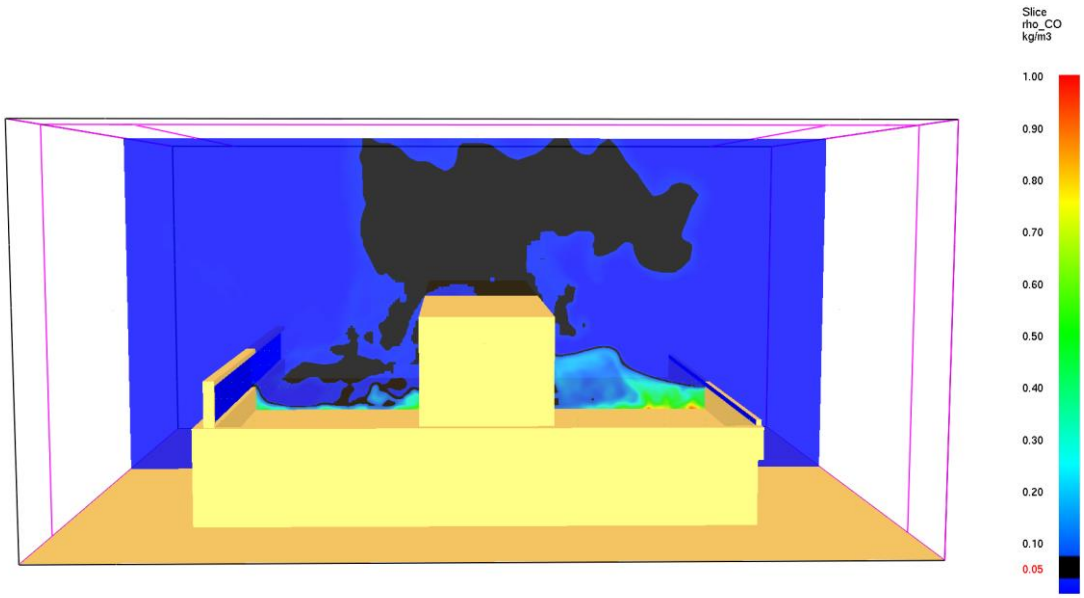


Figura 48 - Sezione della vasca in cui viene evidenziato l'andamento dalla componente della velocità diretta come il getto di spinta per il caso h050w400d075.

Si vede chiaramente come il getto riesca, grazie al richiamo di aria effettuato dalla cappa, a superare l'ostacolo. La zona verde è caratterizzata, come mostrato in legenda, da velocità positive e indica il percorso dell'aria dagli ugelli di spinta fino alla cappa d'aspirazione, che risulta continuo e relativamente uniforme. Inoltre, con l'aumentare dell'altezza dell'ingombro, il getto di spinta incontra difficoltà crescenti per superare l'ostacolo, per questo motivo l'inquinante viene disperso in un volume d'aria sempre maggiore.
Possiamo dedurne che l'indipendenza delle prestazioni al variare della larghezza, verificata al paragrafo precedente, non è influenzata dall'altezza ridotta dell'ostacolo utilizzato. Infatti, non essendoci variazioni significative dell'efficienza quando viene modificata l'altezza, risulta evidente come le prestazioni siano indipendenti dalla larghezza in tutto il *range* di altezze considerato.

4.3.3 Correnti di disturbo

Data l'ampia regione nella quale si diffondono gli inquinanti prima di venire catturati dalla cappa, in particolar modo nel caso di ostacoli molto alti, come visibile nelle due immagini di Figura 49, è facile pensare che in un ambiente di lavoro reale, dove l'aria non è totalmente immobile, le efficienze non siano così alte come quelle riscontrate nel paragrafo precedente.



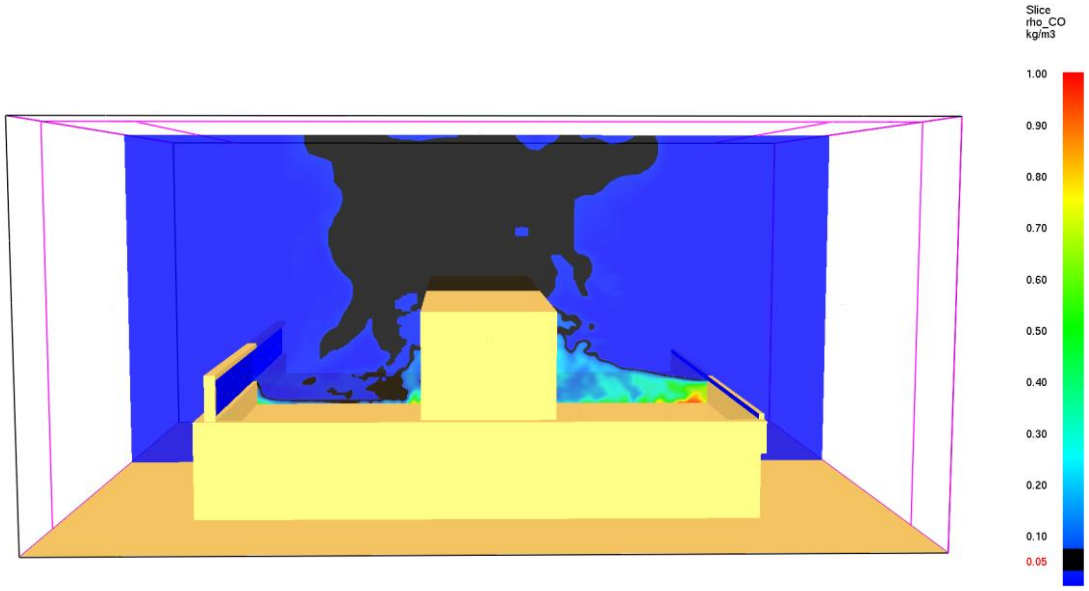


Figura 49 – Sequenza di 2 immagini riguardanti una sezione del caso h050w400d075 in cui viene evidenziato il tracciante. La zona sottolineata in nero è il tracciante a concentrazioni basse, come indicato in legenda, che si sparge molto prima di essere aspirato ed estratto dal dominio

Infatti la presenza di una minima corrente di disturbo potrebbe facilmente allontanare, al di fuori del dominio di calcolo, gli inquinanti dispersi sopra la vasca. Al contrario, in assenza di altri disturbi, essi vengono inesorabilmente aspirati dalla cappa.

Sempre nell'ottica di considerare il caso peggiore possibile, si è pensato di imporre tale flusso d'aria diretto in senso opposto a quello del getto d'aria del *push*. La corrente d'aria di disturbo è stata quindi introdotta dalla parete dietro la cappa di aspirazione, con direzione lungo l'asse x e con velocità pari a 0.25 [m/s]. Questo valore è ritenuto rappresentativo di ciò che si può riscontrare in un normale ambiente di lavoro.

Affinché la corrente d'aria di disturbo si sviluppasse al meglio, prima di raggiungere la vasca e il sistema di ventilazione, il dominio è stato allungato dietro la cappa di aspirazione, in modo tale che arrivasse ad una lunghezza di 3.60 [m].

Non sono state invece prese in considerazione correnti d'aria dirette trasversalmente alla vasca, pur ritenendole di interesse. Queste avrebbero infatti imposto la rinuncia alla simmetria, portando i tempi di calcolo, giè elevati e dell'ordine della decina di giorni, ad essere inaccettabili.

I risultati sono riassunti in Tabella 12:

Tabella 12 – Influenza della larghezza dell'ostacolo in presenza di una corrente di disturbo pari a 0.25 [m/s]

Nome caso	**Altezza ostacolo [m]**	**Larghezza ostacolo [m]**	**Distanza dal *push* [m]**	**Corrente di disturbo [m/s]**	**Efficienza [%]**
h025w050d075v	0.25	0.50	0.75	0.25	99.48
h025w150d075v	0.25	1.50	0.75	0.25	98.07
h025w250d075v	0.25	2.50	0.75	0.25	98.53
h025w400d075v	0.25	4.00	0.75	0.25	96.00

Con l'aumentare della larghezza si nota una lieve diminuzione dell'efficienza, ancora più evidente se si confrontano questi dati con quelli ottenuti nel caso di ambiente di lavoro indisturbato, di Tabella 10, come in Figura 50:

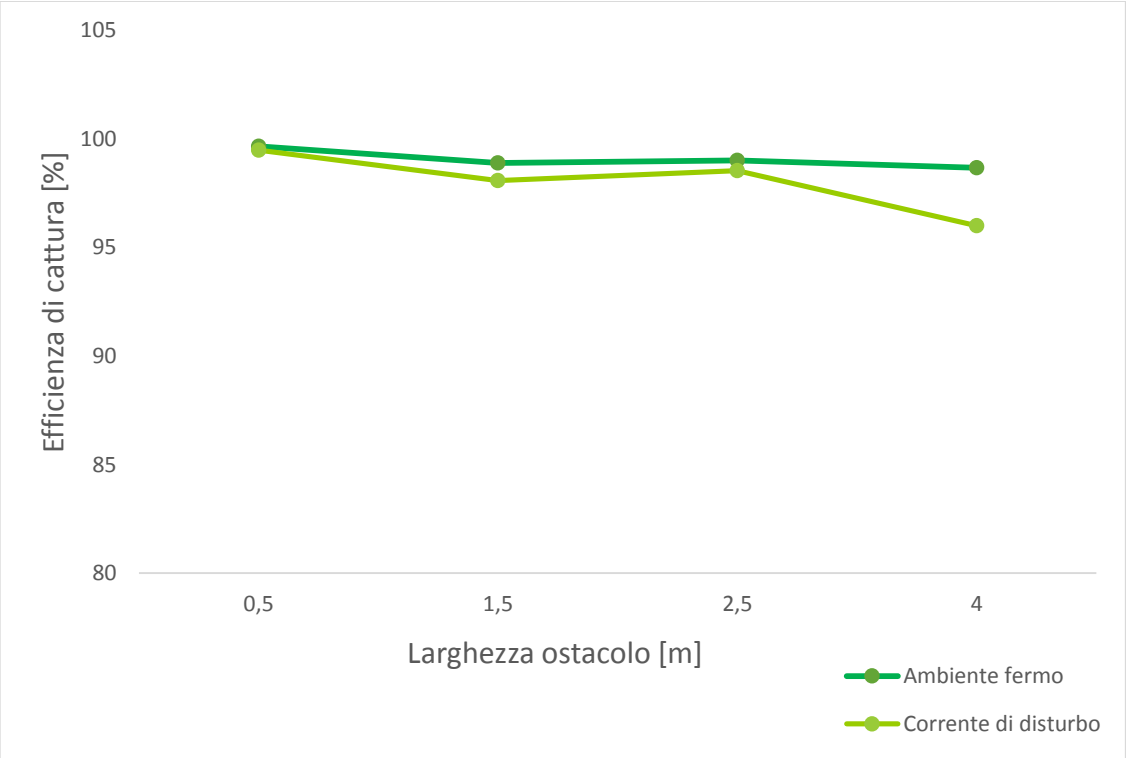


Figura 50 – Confronto dell'influenza della larghezza dell'ostacolo con e senza correnti di disturbo nell'ambiente di lavoro

Per quanto riguarda l'altezza dell'ostacolo le prestazioni calano in maniera evidente, soprattutto una volta superata l'altezza di 0.35 [m], pari al doppio dell'altezza della cappa di aspirazione.

I risultati sono riassunti in Tabella 13:

Tabella 13 – Influenza dell'altezza dell'ostacolo in presenza di una corrente di disturbo pari a 0.25 [m/s]

Nome caso	**Altezza ostacolo [m]**	**Larghezza ostacolo [m]**	**Distanza dal *push* [m]**	**Corrente di disturbo [m/s]**	**Efficienza [%]**
h025w400d075v	0.25	4.00	0.75	0.25	96.00
h030w400d075v	0.30	4.00	0.75	0.25	95.70
h035w400d075v	0.35	4.00	0.75	0.25	95.34
h050w400d075v	0.50	4.00	0.75	0.25	85.34
h075w400d075v	0.75	4.00	0.75	0.25	55.00

Inoltre va sottolineato come, per l'ostacolo alto 0.75 [m], l'efficienza del 55% sia dettata solamente dalla cattura della parte di tracciante emesso dalla superficie della vasca vicina alla cappa. Al contrario tutto il monossido di carbonio emesso prima dell'ostacolo, in prossimita del *push* viene perso. Questo andamento può essere visto in Figura 51, nella quale il tracciante, evidenziato in nero per concentrazioni basse, non riesce in alcun modo a superare l'ostacolo.

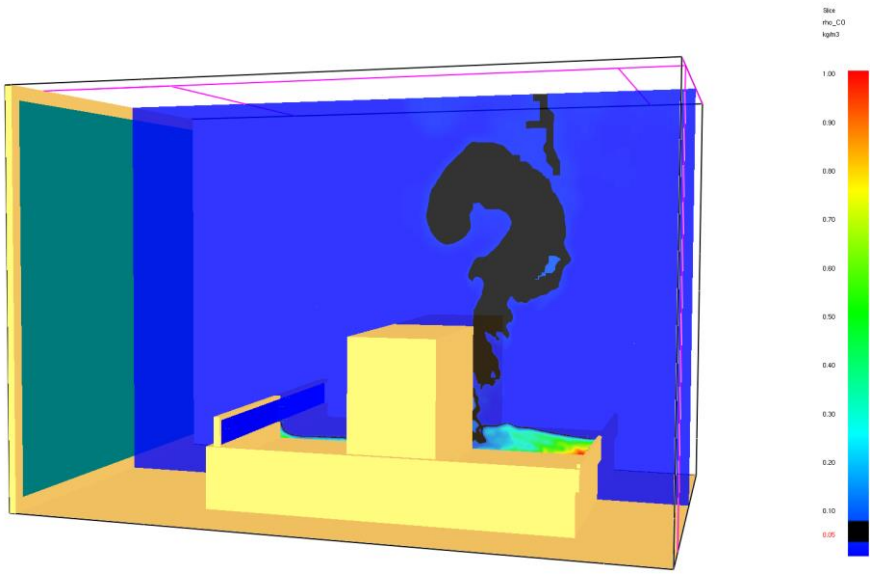


Figura 51 – La slice evidenzia, in nero, il tracciante che sfugge al sistema di ventilazione nel caso h075w400d075v. La parete verde acqua è la superficie dalla quale viene immessa la corrente d'aria di disturbo.

In presenza di correnti di disturbo nell'ambiente anche l'altezza dell'ostacolo che sporge dal pelo libero dela vasca diventa un parametro fondamentale per l'efficace conduzione del sistema di ventilazione. Infatti, confrontando le variazioni relative all'altezza dell'ostacolo con e senza corrente d'aria, come in Figura 52, oltre 0.35[m] si nota una forte variazione tra la curva riguardante l'ambiente fermo e quella relativa ai casi con corrente d'aria.

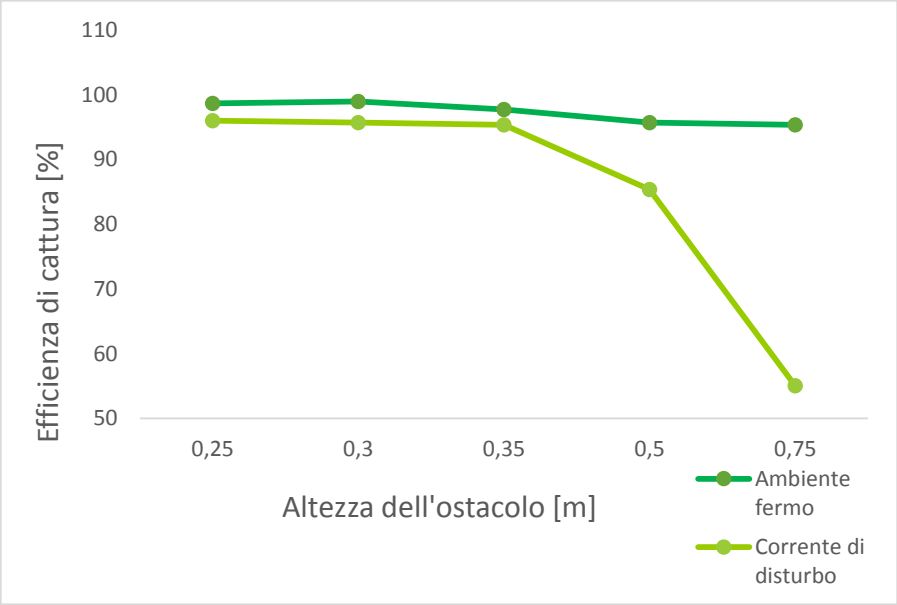


Figura 52 - Confronto dell'influenza dell'altezza dell'ostacolo con e senza correnti di disturbo nell'ambiente di lavoro.

4.4 Parametri controllabili

Dall'osservazione dei profili di velocità si nota facilmente come, in assenza di disturbi, la principale responsabile delle ottime prestazioni del sistema di ventilazione sia l'elevata portata della cappa di aspirazione. A conferma di ciò è stata eseguita la simulazione del caso h025w400d075, nella quale il getto di spinta risulta spento. Si è ottenuta un efficienza del 96.33%, molto vicino a quel 98.67% che avevamo calcolato nel caso in cui il *push-pull* era utilizzato al pieno delle sue potenzialità.

Come si vede infatti dalla sequenza in Figura 53 il tracciante, seppur in maniera più lenta e con forte accumulo davanti agli ugelli di spinta, viene comunque richiamato in cappa quasi totalmente.

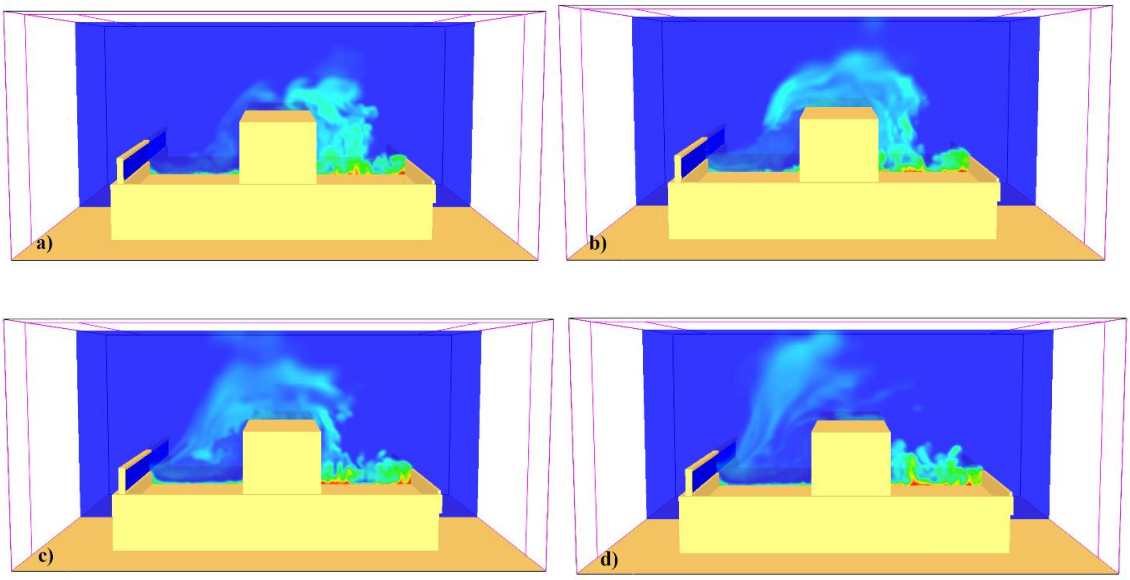


Figura 53 – Sezione in cui si evidenzia il tracciante, relativa al caso h025w400d075 con getto di spinta spento. La sequenza rappresenta 4 istanti di tempo distanziati da un secondo ciascuno. Si nota così il percorso dell'inquinante.

4.4.1 Portata di aspirazione

Visto che le altissime efficienze ottenute sino ad ora sono dovute principalmente all'elevata portata di aspirazione, si è pensato di ridurla del 30%, per capire fino a quanto fosse possibile

diminuire il tiraggio, risparmiando così sui costi operativi dell'intero sistema, senza rinunciare alle elevate prestazioni.
Sono stati quindi simulati i casi elencati in Tabella 14:

Tabella 14 – Riduzione del 30% della portata di aspirazione

Nome caso	**Altezza ostacolo [m]**	**Larghezza ostacolo [m]**	**Distanza dal *push* [m]**	**Aria di disturbo [m/s]**	**Efficienza [%]**	**Riduzione aspirazione**
h025w050asp	0.25	0.50	0.75	0.25	97.44	30%
h025w150asp	0.25	1.50	0.75	0.25	91.90	30%
h025w250asp	0.25	2.50	0.75	0.25	86.60	30%
h025w400asp	0.25	4.00	0.75	0.25	78.30	30%
h030w400asp	0.30	4.00	0.75	0.25	68.00	30%
h035w400asp	0.35	4.00	0.75	0.25	62.30	30%
h050w400aps	0.50	4.00	0.75	0.25	54.70	30%

I dati ottenuti evidenziano che una riduzione del 30% è eccessiva, poichè non permette di mantenere elevate le efficienze di cattura.

4.4.1.1 Influenza dell'altezza con portata aspirante ridotta

Viene confermata, anche se in maniera più marcata per via della riduzione dell'aspirazione, la tendenza delle prestazioni a diminuire con l'altezza dell'ostacolo. Confrontando i risultati appena ottenuti, con quelli di casi analoghi nei quali la portata di aspirazione rispettava i criteri ACGIH, si può notare come una portata di aspirazione ridotta comporti una significativa diminuzione dell'efficienza di cattura. Questa differenza è evidenziata dalla Figura 54.

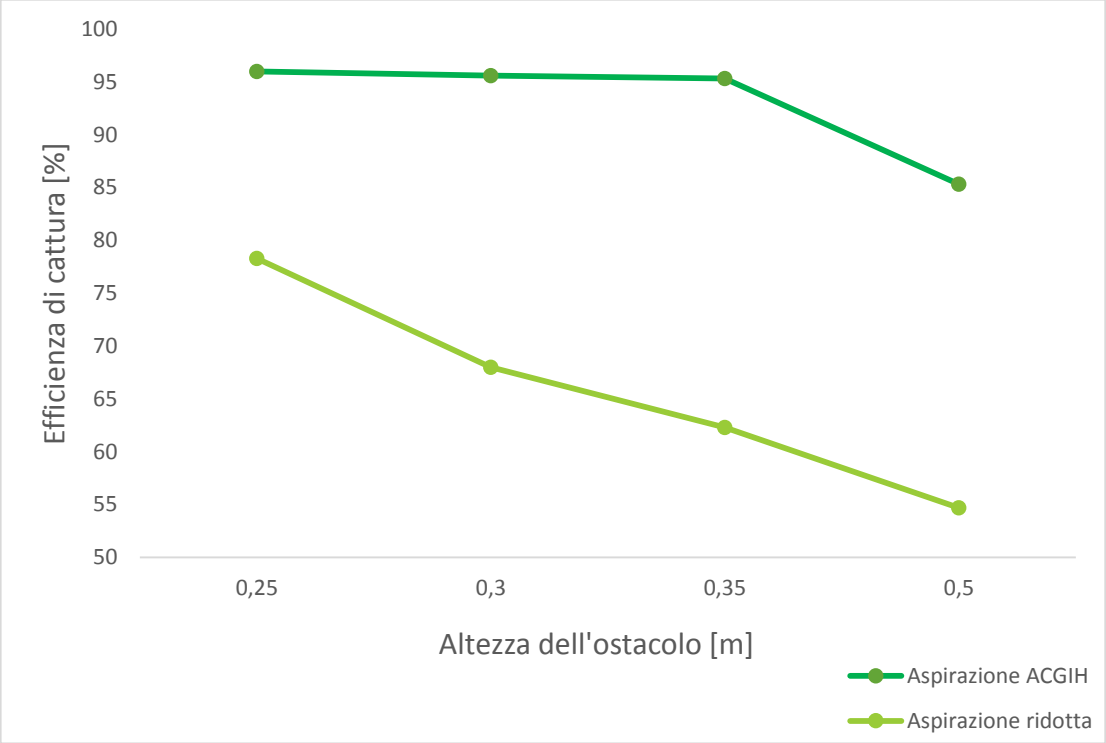


Figura 54 - Confronto dell'influenza dell'altezza dell'ostacolo con la portata d'aspirazione calcolata secondo le linee guida ACGIH e ridotta del 30%.

Si noti che non è stato indagato il caso con ostacolo di altezza pari a 0.75 [m]. Infatti non risulta più di nostro interesse poichè già nelle condizioni precedenti, nelle quali la portata d'aspirazione rispettava i criteri ACGIH, dava pessimi risultati in termini di efficienza di cattura.

4.4.1.2 Influenza della larghezza con portata aspirante ridotta

Contrariamente a quanto avveniva rispettando i parametri ACGIH, riducendo l'aspirazione della cappa si notano delle variazioni dell'efficienza di cattura con la larghezza dell'ostacolo, come ben visibile in Figura 55:

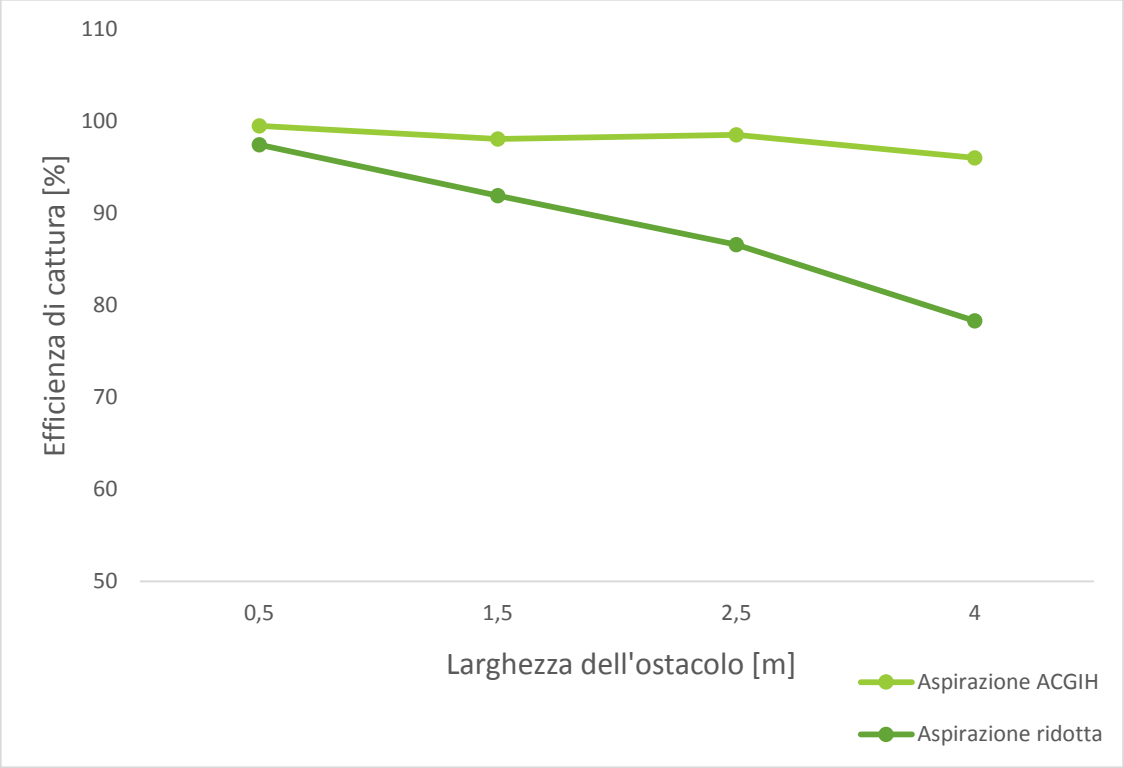


Figura 55 - Confronto dell'influenza della larghezza dell'ostacolo con la portata d'aspirazione calcolata secondo le linee guida ACGIH e ridotta del 30%.

4.4.2 Posizione dell'ostacolo

Un altro parametro controllabile è la posizione in cui viene introdotto l'ostacolo. Questo infatti può essere sia posto al centro della vasca, come considerato finora, che immerso nel bagno in un punto più vicino al *push* o più lontano da esso.

Per capire se la posizione dell'ostacolo nella vasca influenzasse i risultati sono stati simulati i casi di Tabella 15:

Tabella 15 – Influenza della posizione dell'ostacolo

Nome caso	**Altezza ostacolo [m]**	**Larghezza ostacolo [m]**	**Distanza dal *push* [m]**	**Corrente di disturbo [m/s]**	**Efficienza [%]**
h025w400d040	0.25	4.00	0.40	assente	99.70
h025w400d040v	0.25	4.00	0.40	0.25	98.97
h025w400d040asp	0.25	4.00	0.40	0.25	95.52
h025w400d075	0.25	4.00	0.75	assente	98.67
h025w400d075v	0.25	4.00	0.75	0.25	96.00
h025w400d075asp	0.25	4.00	0.75	0.25	94.37
h025w400d110	0.25	4.00	1.10	assente	99.60
h025w400d110v	0.25	4.00	1.10	0.25	99.51
h025w400d110asp	0.25	4.00	1.10	0.25	95.22

Si nota che l'efficienza di cattura del sistema di ventilazione non è per nulla influenzata dalla posizione dell'ostacolo. Infatti, sia in condizioni di ambienete fermo che in presenza di correnti di disturbo, non si notano variazioni significative. Anche con una riduzione del 30% della porata aspirata dalla cappa non si notano variazioni delle prestazioni del sistema di ventilazione.

Conclusioni

Il *push-pull* è un sistema di ventilazione locale molto utilizzato per vasche di trattamento industriali. Nonostante ciò non esistono degli studi riguardanti gli effetti degli ostacoli sulle prestazioni di questi sistemi di ventilazione.

Il lavoro di tesi aveva proprio lo scopo di iindagare le variazioni dell'efficienza indotte da ostacoli di varie dimensioni posti al centro della vasca.

Il lavoro svolto ha confermato come le dimensioni dell'ostacolo influenzino le prestazioni dei sistemi di ventilazione *push-pull*. Sebbene l'efficienza di cattura non risenta della larghezza dell'ostacolo e sia poco influenzata dall'altezza di quest'ultimo in condizioni ambientali di quiete, in presenza di correnti di disturbo la situazione cambia significativamente. Infatti, introducendo una debole corrente d'aria, sempre presente in un normale ambiente di lavoro, si nota come l'altezza dell'ostacolo influenzi in maniera più marcata l'efficienza di cattura, diminuendo le prestazioni del sistema di ventilazione in maniera proporzionale al crescere dell'altezza.

La larghezza, al contrario, continua ad essere un parametro poco significativo, non inficiando le prestazioni del *push-pull* nemmeno per ostacoli di larghezza paragonabile a quella della vasca.

Nelle simulazioni si nota che le ottime prestazioni dei *push-pull* sono dovute soprattutto all'elevata portata della cappa di aspirazione. È stata dunque ridotta del 30% rispetto al valore consigliato dall'ACGIH, anche per capire se vi fossero i margini per diminuire i costi operativi. Queste prove hanno confermato la marcata influenza dell'altezza dell'ostacolo sull'efficienza di captazione. Inoltre, contrariamente a quanto accade seguendo le linee guìda

ACGIH, aumentando la larghezza dell'ostacolo si notano anche delle variazioni nell'efficienza di cattura.

Infine la posizione dell'ostacolo non ha alcun effetto significativo sulle prestazioni del sistema di ventilazione; infatti, né avvicinando l'ostacolo al *push*, né allontanandolo si notano differenze, anche in presenza di correnti di disturbo e in caso di riduzione della portata aspirante.

Il passo successivo a questo lavoro potrebbe essere l'estensione delle linee guida ACGIH a vasche di trattamento contenenti ostacoli, in funzione della dimensione di questi ultimi. Potrebbe infine essere interessante anche andare ad analizzare i transitori di inserimento ed estrazione dell'oggetto dalla vasca, così da valutarne l'importanza e l'effetto sulle prestazioni.

Bibliografia

[1] G. Nano e R. Rota, Principi di ventilazione industriale, ADII - Associazione italiana degli igienisti industriali: Editors G.Sesana, C.Sala.

[2] E. T. H. D. Goodfellow, Industrial Ventilation Design Guidebook, Toronto: Academic Press, 2001.

[3] ACGIH, Industrial Ventilation: A Manual of Recommended Practice for Design, 28th a cura di, Cincinnati, Ohio: ACGIH, 2013.

[4] E. G. A. M. A. B. F. Marzal, «Influence of Push Element Geometry on Capture Efficiency of Push-Pull Ventilation System for Open Surface Tanks,» *The Annals of Occupational Hygiene,* vol. 46, n. 4, pp. 383-393, 2002.

[5] H. B. Awbi, Ventilation of Buildings, London: Spon Press, 2003.

[6] E. G. A. M. A. B. F. Marzal, «Determination And Interpretation of Total and Transversal Linear Efficiency in Push-Pull Ventilation System for Open Surface Tanks,» *The Annals of Occupational Hygiene,* vol. 46, n. 7, pp. 629-635, 2002.

[7] S. Y. L. e. a. R.F. Huang, «Aerodynamic Characteristics and Design Guidelines of Push-Pull Ventilation System,» *The Annals of Occupational Hygiene,* vol. 49, n. 1, pp. 1-15, 2004.

[8] D. B. I. M. Robinson, «Design and operating parameters for push-pull ventilation of open surface tanks,» *International Journal of Energy Research,* vol. 27, n. 8, pp. 757-770, 2003.

[9] G. N. L. C. R. Rota, «Design Guidelines for Push-Pull Ventilation System Through Computational Fluid Dynamics Modelling,» *American Industrial Hygiene Association,* vol. 62, n. 2, pp. 141-148, 2001.

[10] R. R. F. B. R. Braconnier, «An Experimental and Numerical Study of the Capture,» in *Ventilation '91: 3rd International Symposium on Ventilaztion for Contaminant Control*, H. D. G. G. S. R. R. T. Hughes, A cura di, Cincinnati, Ohio: American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), 1993, pp. 16-20.

[11] F. C. A. P. V. Betta, «Push-Pull ventilation system: a CFD approach for the performances analysis,» *The International Journal of Ambient Energy,* vol. 28, n. 3, pp. 123-134, 2007.

[12] C. N. L. Bonanno, «Influenza degli ostacoli sulla capacità di cattura dei sistemi push-pull,» 2001.

[13] S. e. a. K. McGrattan, Fire Dyamics Simulator User's Guide, National Institute of Standards and Technology Special Publication , 2014.

[14] V. N. P. Smardz, «Validation of Fire Dynamic Simulator (FDS) for forced and natural convection,» University of Ulster, 2006.

[15] A. Cuoci, «Materiale didattico del corso: Fluidodinamica degli Incendi,» 2014.

[16] S. e. a. K. McGrattan, Fire Dyamics Simulator Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model, National Institute of Standards and Technology Special Publication , 2014.

[17] G. G. V. G. Ascenzi, Ingegneria della sicurezza antincendio - Guida all'utilizzo di FDS, F. Dario, A cura di, Collana Aicarr, 2010.

[18] G. P. Forney, Smokeview, A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data Volume II: Technical Reference Guide, National Institute of Standards and Technology Special Publication , 2014.

[19] G. P. Forney, Smokeview, A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data Volume I: User's Guide, National Institute of Standards and Technology Special Publication , 2014.

Appendice

Si riporta, a titolo di esempio, il file di input FDS relativo al caso h025w250d075v.

```
&HEAD CHID='h025w250d075v',TITLE='h025w250d075v'/

&CHECK_VN=.TRUE.        / Aiuta a migliorare la stabilità

&TIME T_END=100.0    /
&DUMP NFRAMES=1000.0, DT_DEVC=0.1, DT_DEVC_LINE=0.1, DT_RESTART=10.   /

&MESH IJK= 61, 54, 6, XB= 0.32,2.76, 0.00,2.16, 0.00,0.24          / mesh 1.1 - 4[cm]
&MESH IJK=244,216,60, XB= 0.32,2.76, 0.00,2.16, 0.24,0.84          / mesh 1.2 - 1[cm]
&MESH IJK=122,108,10, XB= 0.32,2.76, 0.00,2.16, 0.84,1.04          / mesh 1.3 - 2[cm]
&MESH IJK= 61, 54,15, XB= 0.32,2.76, 0.00,2.16, 1.04,1.64          / mesh 1.4 - 4[cm]
&MESH IJK= 90,     9,25, XB= 0.00,3.60, 2.16,2.52, 0.00,1.00       / mesh 2 - 4[cm]
&MESH IJK= 90,     9,16, XB= 0.00,3.60, 2.16,2.52, 1.00,1.64       / mesh 2.1 - 4[cm]
&MESH IJK=   8,   54,25, XB= 0.00,0.32, 0.00,2.16, 0.00,1.00       / mesh 3 - 4[cm]
&MESH IJK=   8,   54,16, XB= 0.00,0.32, 0.00,2.16, 1.00,1.64       / mesh 3.1 - 4[cm]
&MESH IJK=  21,   54,25, XB= 2.76,3.60, 0.00,2.16, 0.00,1.00       / mesh 4 - 4[cm]
&MESH IJK=  21,   54,16, XB= 2.76,3.60, 0.00,2.16, 1.00,1.64       / mesh 4.1 - 4[cm]

&VENT ID= 'pianosimmetria', SURF_ID= 'MIRROR', PBY= 0.00   /

&VENT XB= 0.00, 0.00, 0.00, 2.52, 0.00, 1.64, SURF_ID='OPEN'  /
&VENT XB= 0.00, 3.60, 2.52, 2.52, 0.00, 1.64 SURF_ID='OPEN'   /
&VENT XB= 0.00, 3.60, 0.00, 2.52, 1.64, 1.64, SURF_ID='OPEN'  /

&OBST XB= 0.50,2.60, 0.00,2.04, 0.00,0.26,                    /
&OBST XB= 0.50,0.52, 0.00,2.04, 0.26,0.36,                    /
&OBST XB= 2.52,2.60, 0.00,2.04, 0.26,0.36,                    /
&OBST XB= 0.52,2.60, 2.00,2.04, 0.26,0.36,                    /

&OBST XB= 1.27,1.77, 0.00,1.25, 0.26,0.51,        /  ostacolo (metà: sfrutto anche per lui la simmetria!)

&SPEC ID='CARBON MONOXIDE'              /

&SURF ID='POLLUTANT',
        SPEC_ID(1)='CARBON MONOXIDE',
        MASS_FLUX(1)=0.01,
        RAMP_MF(1)='alimentazione inquinante',                /
```

```
&RAMP ID='alimentazione inquinante', T= 00.0, F=0.0                    /
&RAMP ID='alimentazione inquinante', T= 10.0, F=0.0                    /
&RAMP ID='alimentazione inquinante', T= 12.0, F=0.2                    /
&RAMP ID='alimentazione inquinante', T= 14.0, F=0.8                    /
&RAMP ID='alimentazione inquinante', T= 16.0, F=1.0                    /

&VENT XB= 0.52,2.52, 1.25,2.00, 0.26,0.26, SURF_ID='POLLUTANT'  /
&VENT XB= 0.52,1.27, 0.00,1.25, 0.26,0.26, SURF_ID='POLLUTANT'  /
&VENT XB= 1.77,2.52, 0.00,1.25, 0.26,0.26, SURF_ID='POLLUTANT'  /

&DUMP MASS_FILE=.TRUE.                                          /

&OBST XB= 0.50, 0.52, 0.00, 2.00, 0.36,0.38,                    / push element
&VENT XB= 0.52, 0.52, 0.00, 2.00, 0.36,0.38, SURF_ID='PUSH'     /
&SURF ID='PUSH', VEL=-3.33526, COLOR='BLUE' , RAMP_V='avviamento pushpull'     /

&RAMP ID='avviamento pushpull', T= 00.0, F=0.0                  /
&RAMP ID='avviamento pushpull', T= 01.0, F=0.0                  /
&RAMP ID='avviamento pushpull', T= 03.0, F=0.5                  /
&RAMP ID='avviamento pushpull', T= 05.0, F=1.0                  /

&OBST XB= 2.54, 2.56, 0.00, 2.02, 0.36,0.51,                    / exhaust hood
&VENT XB= 2.54, 2.54, 0.00, 2.00, 0.36,0.51, SURF_ID='PULL'     / superficie ventilante
&SURF ID='PULL', VOLUME_FLOW=1.524, COLOR='BLUE'                / pull flow

&OBST XB=2.520,2.560, 0.000,2.020,0.510,0.530                   / cappa aspirazione cornice 1
&OBST XB=2.520,2.560, 2.000,2.020,0.360,0.530                   / cappa aspirazione cornice 2

&OBST XB= 3.56, 3.60, 0.00, 2.52, 0.00,1.64,                    /
&VENT XB= 3.56, 3.56, 0.00, 2.44, 0.08,1.56, SURF_ID='DISTURBO'  /
&SURF ID='DISTURBO', VEL=-0.25, COLOR='TEAL'                    /

&DEVC ID='h025w250d075v_CO_sorgente1',   XB= 0.52,2.52, 1.25,2.00, 0.26,0.26, QUANTITY='MASS
FLOW WALL', IOR=3                                /
&DEVC ID='h025w250d075v_CO_sorgente2',   XB= 0.52,1.27, 0.00,1.25, 0.26,0.26, QUANTITY='MASS
FLOW WALL', IOR=3                                /
&DEVC ID='h025w250d075v_CO_sorgente3',   XB= 1.77,2.52, 0.00,1.25, 0.26,0.26, QUANTITY='MASS
FLOW WALL', IOR=3                                /
&DEVC ID='h025w250d075v_CO_aspirato',            XB= 2.52,2.52, 0.00,2.00, 0.36,0.51,
QUANTITY='MASS FLUX X',SPEC_ID='CARBON MONOXIDE' STATISTICS='AREA INTEGRAL'   /

&DEVC ID='h025w250d075v_CO_persoDX',   XB= 0.00,3.56,  2.52,2.52,  0.00,1.64, QUANTITY='MASS
FLUX Y',SPEC_ID='CARBON MONOXIDE' STATISTICS='AREA INTEGRAL'  /
&DEVC ID='h025w250d075v_CO_persoTOP',  XB= 0.00,3.56,  0.00,2.52,  1.64,1.64, QUANTITY='MASS
FLUX Y',SPEC_ID='CARBON MONOXIDE' STATISTICS='AREA INTEGRAL'  /
&DEVC ID='h025w250d075v_CO_persoPUSH', XB= 0.00,0.00,  0.00,2.52,  0.00,1.64,
QUANTITY='MASS FLUX X',SPEC_ID='CARBON MONOXIDE' STATISTICS='AREA INTEGRAL'  /
&DEVC ID='h025w250d075v_portata_aspirata',  XB= 2.54,2.54, 0.00, 2.00, 0.36,0.51, QUANTITY='MASS
FLOW WALL', IOR=-1                               /

&DEVC XYZ=0.54,1.98,0.36, QUANTITY='U-VELOCITY', ID='h025w250d075v_uvel_054_198_036'/
&DEVC XYZ=0.56,1.98,0.36, QUANTITY='U-VELOCITY', ID='h025w250d075v_uvel_056_198_036'/
&DEVC XYZ=0.58,1.98,0.36, QUANTITY='U-VELOCITY', ID='h025w250d075v_uvel_058_198_036'/
[...]

&SLCF PBY= 0.50,QUANTITY='DENSITY', SPEC_ID='CARBON MONOXIDE', /
&SLCF PBY= 1.00,QUANTITY='DENSITY', SPEC_ID='CARBON MONOXIDE', /
```

```
&SLCF PBY= 1.50,QUANTITY='DENSITY', SPEC_ID='CARBON MONOXIDE', /
&SLCF PBX= 2.00,QUANTITY='DENSITY', SPEC_ID='CARBON MONOXIDE', /
&SLCF PBZ= 0.30,QUANTITY='DENSITY', SPEC_ID='CARBON MONOXIDE', /
&SLCF PBZ= 0.45,QUANTITY='DENSITY', SPEC_ID='CARBON MONOXIDE', /
&SLCF PBZ= 0.60,QUANTITY='DENSITY', SPEC_ID='CARBON MONOXIDE', /
&SLCF PBY= 0.30,QUANTITY='U-VELOCITY',VECTOR=.TRUE./
&SLCF PBY= 1.00,QUANTITY='U-VELOCITY',VECTOR=.TRUE./
&SLCF PBY= 1.70,QUANTITY='U-VELOCITY',VECTOR=.TRUE./

&TAIL /
```