

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea in Ingegneria Energetica e Nucleare

Tesi di Laurea Magistrale

**Modellazione CFD di rilasci incidentali di gas infiammabili e tossici in
piattaforme Oil&Gas**



Relatori

Prof. Andrea Carpignano

Dott. Anna Chiara Ugenti

Prof.ssa Raffaella Gerboni

Candidato

Alberto Moscatello

Anno Accademico 2017-2018

*A me stesso,
ai miei genitori,
ai miei fratelli.
A chiunque mi ami
e a chiunque io ami.*

«There is no dark side in the moon, really. Matter of fact it's all dark. The only thing that makes it look alight is the sun.»

ABSTRACT

Industrial safety is a crucial issue in the modern social debate. Nowadays people's sensitivity towards the environmental and social impact of big industrial activities is growing fast. As a consequence, technological development is paying more attention to safety issues than it did in the past so as to guarantee a high probability of protection of the environment and the people in case of accidental events. In particular, the offshore context is intrinsically dangerous since flammable and/or toxic substances are involved; the consequences of an accident in such a context can be disastrous as we can learn from the various past oil accidents. For all the reasons previously mentioned, the prevention and mitigation of accidents and in general all the safety issues in this kind of environment need a special attention.

This work takes place in the context of Risk Analysis of off-shore platforms, in particular Natural Gas production platforms. The accidental release of methane from a pressurized pipeline in a platform deck will be analyzed. Such accidental event will be studied through numerical analysis that in this case is the computational fluid-dynamics (CFD). The aim is to analyze the possible consequences of this kind of accident and to quantify the annexed damages.

There are different ways to face this kind of problem, and CFD is the one we chose. There are also various CFD approaches to handle this specific case of accidental gas release in a platform, in particular we deal with: "one step" approach and "two steps" approach. In the first one the simulation models the entire phenomenon while in the second one the event is split into two phases: the initial one is called "release" and the second one is the "dispersion". In this last approach the *release* is simulated into a small domain called "source box", and then the results extrapolated from its output faces are used as input for the second phase, the *dispersion* one.

One of the aims of this work is to find a way to realize a "coupling" between the phases of the two-steps approach, by making the results of the release phase suitable for being used as input boundary conditions for the dispersion phase. Besides, a sensitivity analysis is carried out in order to understand how the solution is affected by the level of detail used to give the results of the first step to the second one.

The other important aspect of this work is the attempt to realize a benchmark simulation by means of the one-step approach, simulating the entire release event. In this simulation all the functional and geometrical parameters are kept constant w.r.t. the coupling simulation in order to make possible a direct comparison between the two approaches. This comparison is carried out not only on the results but also on some other elements like computational cost and implementation time.

One of the main results achieved in this work is the development of a coupling method for the "release" and "dispersion" phases of the two-steps approach; we can say that a first draft of this model is now ready, and it can be used as a tool for other purposes like a preliminary design of a Fire&Gas detection system. The other important result is the demonstration of the difficulties arising from the application of the one-step approach to a gas release case of the kind treated in this work; it appears to be too expensive in terms of time and computational power.

The present work is part of a bigger project financed by the "Ministero dello Sviluppo Economico", and was realized in the SEADOG laboratory of Polytechnic of Turin.

La sicurezza industriale rappresenta un tema cruciale del dibattito sociale moderno. L'attenzione dell'opinione pubblica nei confronti di temi quali l'impatto ambientale e sociale delle opere industriali è costantemente in crescita e, di conseguenza, lo sviluppo tecnologico è oggi indirizzato a soddisfare requisiti di sicurezza molto più stringenti rispetto al passato, che garantiscano con buona probabilità la salvaguardia di territorio e persone in caso di eventi incidentali. In particolare, il contesto off-shore è intrinsecamente pericoloso in quanto si ha a che fare con sostanze pericolose (tossiche e/o infiammabili...), perciò le conseguenze di un incidente in tale situazione possono essere devastanti come dimostrano i vari disastri petroliferi verificatisi in passato. Per tutti questi motivi gli aspetti di prevenzione e mitigazione degli incidenti e sicurezza in generale in tale ambiente richiedono un'attenzione particolare.

Il presente lavoro si cala in un contesto di analisi di rischio delle piattaforme off-shore, in particolare quelle di produzione di Gas Naturale. Il caso che verrà analizzato sarà quello di un rilascio incidentale di metano da una tubazione in pressione in un piano (deck) di una piattaforma. L'evento incidentale in questione è stato studiato tramite analisi numerica, ovvero è stato simulato sfruttando come strumento la fluidodinamica computazionale.

Gli approcci possibili per affrontare tale problema sono diversi, tra i quali figura l'analisi CFD che sarà quella scelta in questo caso. In particolare, gli approcci CFD che verranno considerati qui sono due: approccio "one step", approccio "two steps". Nel primo viene sviluppata una simulazione che modella tutto il fenomeno fisico a partire dal rilascio; nel secondo l'intero evento viene diviso in due parti, la fase iniziale del rilascio chiamata appunto "rilascio" e una fase successiva chiamata "dispersione". In quest'ultimo caso il rilascio viene simulato in un dominio ridotto chiamato "source box", e i risultati estrapolati dalle facce esterne di quest'ultima vengono usati come input della seconda fase, ovvero la dispersione nella piattaforma.

In questo lavoro ci si è posti l'obiettivo di effettuare un "accoppiamento" delle due fasi di un approccio two steps, cercando di rendere i risultati estrapolati dalla source box adatti ad essere usati come input per la seconda fase. Si è inoltre studiato, tramite un'analisi di sensitività, l'effetto che può avere sulla soluzione la scelta del livello di dettaglio con il quale dare i risultati della prima fase a quella successiva.

È stato affrontato inoltre l'approccio one-step cercando di implementare una simulazione che fosse comprensiva dell'intero evento di rilascio. In tale simulazione sono stati tenuti invariati tutti i parametri di base quali geometria, condizioni al contorno e tutti i parametri funzionali, rispetto alla simulazione two-steps effettuata in precedenza in modo tale da poter fare un confronto diretto tra i due approcci. Il confronto è stato effettuato sia sui risultati che su altri aspetti quali costo computazionale e tempi di implementazione e calcolo.

Il primo principale risultato ottenuto è quello di aver fatto un importante passo avanti nello sviluppo del modello "two-steps" realizzando un accoppiamento funzionale delle fasi di *rilascio* e *dispersione*; si può affermare dunque di aver concluso una prima bozza del modello a due steps, che potrà essere utilizzato come strumento per sviluppi futuri come ad esempio la progettazione della sensoristica FIre&Gas. L'altro importante risultato è quello di aver dimostrato come un approccio CFD classico (one-step) sia difficilmente applicabile a situazioni come quella presa in analisi in questo lavoro; le criticità messe in evidenza, sembrano porre dei seri limiti a questo approccio su diversi fronti, come ad esempio il tempo di calcolo e il costo computazionale.

Il lavoro si cala nel contesto di un progetto finanziato dal Ministero dello Sviluppo Economico (MISE) ed è stato realizzato presso il laboratorio SEADOG (Safety & Environmental Analysis Division for Oil & Gas) del Politecnico di Torino.

Ringraziamenti

Il primo pensiero va alla mia famiglia. Ai miei genitori, Ada e Donato, che hanno raggiunto l'obiettivo di riuscire a darmi tutte le opportunità possibili per crescere come persona, che sono riusciti a trasmettermi l'importanza dell'impegno e del lavoro e che mi hanno educato al rispetto e alla bellezza della diversità. Ai miei fratelli, Dario e Fiorella, con i quali ho un rapporto indescrivibile a parole, perché penso sempre che il linguaggio abbia un limite e fallirebbe in questa circostanza; è proprio oltre quel limite che si pone il concetto che rappresenta il legame che sento di avere con loro. La cosa più grande che hanno fatto è stata quella di avermi aiutato a lasciar venir fuori la mia personalità in maniera spontanea e genuina, facendomi sentire sempre adeguato e compreso. A mia nonna, Cesaria, una donna mostruosamente forte, che a 90 anni riesce ancora a dimostrare che i limiti non esistono, se non nella nostra testa.

Ringrazio tutti i miei cugini, in particolare Salvatore, che con i suoi pregi e i suoi difetti è stato una guida e mi ha insegnato tanto, Andrea, grazie al quale ho coltivato l'amore per musica e per la chitarra, Anna, che è stata una grande confidente quando ancora ero un ragazzino e Gaetano, un fratello per me.

Anche i miei amici hanno avuto un ruolo importante, a partire da quelli un po' più vecchi con cui ho condiviso gli anni del liceo, ad arrivare al "clan" torinese, che è diventato la mia nuova famiglia. La possibilità di potersi lasciare andare e sfogare liberamente nella più totale ignoranza e di poter liberare completamente la testa nelle nostre serate è stata fondamentale per portare a termine gli studi.

Un sentito ringraziamento va al prof. A. Carpignano, che sin da subito si è dimostrato molto disponibile ed entusiasta di accogliermi nella sua squadra e che è stato sempre presente durante il percorso di sviluppo della tesi. Un particolare ringraziamento va a due splendide persone, la prof.ssa R. Gerboni, per la professionalità e per l'umanità con cui si è relazionata con me e alla dott.ssa A.C. Ugenti, che mi ha accompagnato nello svolgimento del lavoro con una disponibilità ed una gentilezza fuori dal comune.

INDICE

INTRODUZIONE.....	1
Capitolo 1 CONTESTO.....	3
1.1 Obiettivi della tesi.....	6
1.2 Situazione energetica nel mondo ed in Italia.....	8
1.2.1 Gas Naturale.....	10
1.2.2 Piattaforme offshore.....	13
1.2.3 Sicurezza in ambiente offshore.....	18
1.2.4 Offshore in Italia.....	20
1.3 Analisi di rischio.....	22
Capitolo 2 ANALISI CFD DI UN RILASCIO DI GAS INFIAMMABILE.....	26
2.1 Fisica del problema.....	26
2.2 Approcci semi-empirici e CFD.....	29
2.2.1 Source Box nell’approccio “two steps”.....	30
2.2.2 Cenni sulla fluidodinamica computazionale (CFD).....	33
2.3 ANSYS Fluent.....	36
2.4 “Coupling” e studio di sensibilità.....	37
2.4.1 Metodo generale per il “coupling”.....	37
2.4.2 Analisi di sensitività.....	43
2.4.3 Caratteristiche generali delle simulazioni.....	44
2.4.4 Impostazione BCs interfaccia SB/piattaforma (SET 1, SET 2, coupling).....	52
Capitolo 3 ANALISI RISULTATI STUDIO SENSITIVITA’.....	56
Capitolo 4 APPROCCIO “ONE STEP”.....	64
4.1 Introduzione alla simulazione “one step”.....	64
4.2 Punto di partenza e criticità.....	65
4.3 Impostazioni e caratteristiche della simulazione.....	67
4.3.1 Modello CAD 3D.....	68
4.3.2 Mesh.....	69
4.3.3 “Setup” dei modelli di risoluzione.....	72
4.4 Grid Indipendence.....	74
Capitolo 5 ANALISI DEI RISULTATI E CONFRONTO “ONE-STEP” vs “TWO-STEPS”.....	79
Capitolo 6 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUFURI.....	85
BIBLIOGRAFIA.....	87
APPENDICE A.....	89
APPENDICE B.....	90
APPENDICE C.....	91
APPENDICE D.....	92
APPENDICE E.....	93
APPENDICE F.....	94

APPENDICE G.....	95
APPENDICE H.....	97
APPENDICE I.....	98

INTRODUZIONE

Oggigiorno la sensibilità, da parte di tutta la popolazione mondiale, nei confronti di temi come sostenibilità ambientale e sociale di tutte le opere ingegneristiche più imponenti, che siano di tipo infrastrutturale o industriale, è costantemente in crescita per diversi fattori. Sicuramente un motivo di questa crescita risiede nell'impatto sociale ed emotivo che hanno avuto incidenti di grossa portata avvenuti nel corso degli anni e che hanno causato ingenti danni ad ambiente e/o popolazione; per fare un esempio molto attuale ricordiamo il crollo del ponte Morandi di Genova, ed in ambito industriale ricordiamo storicamente diversi incidenti petroliferi come quello del 2010 riguardante la piattaforma *Deep Water Horizon*.

La risposta pratica a questa sensibilizzazione è stata quella di spingere in maniera più decisa su aspetti quali sicurezza e prevenzione in tutte le opere di grande portata che coinvolgano dei rischi di incidenti gravi per ambiente e popolazione. In tal contesto si colloca l'analisi di rischio, che si pone l'obiettivo di "prevedere" tutti i possibili incidenti e le possibili conseguenze che potrebbero verificarsi durante il normale esercizio di un impianto, al fine di poter adottare le giuste misure di prevenzione o mitigazione dei possibili danni.

Il presente lavoro di tesi si colloca nello specifico nell'ambito dell'analisi di rischio nel settore Oil&Gas offshore e, in particolar modo, si fa riferimento a piattaforme di produzione di Gas Naturale, che ad oggi sono quelle maggiormente diffuse sul territorio italiano. Nonostante negli ultimi anni sia iniziata una transizione energetica che porterà all'impiego sempre maggiore delle fonti rinnovabili, gli idrocarburi rappresentano ad oggi e per il prossimo futuro una fonte irrinunciabile per il soddisfacimento del fabbisogno mondiale; in particolare il consumo di Gas Naturale ha registrato una crescita negli ultimi anni (Capitolo 1), che si prevede continuerà nei prossimi anni data anche la scoperta di nuove zone ad "acque profonde" che potranno essere sfruttate in futuro.

Una piattaforma di estrazione e produzione di Gas Naturale è intrinsecamente un ambiente soggetto a diversi rischi, prima di tutto perché si ha a che fare con sostanze infiammabili e/o tossiche, ed inoltre perché si trova ad esercitare le sue funzioni in mare aperto con tutti i rischi ambientali e meteorologici che ne conseguono. Per tutti questi motivi diventa indispensabile effettuare studi approfonditi finalizzati all'identificazione di pericoli e allo sviluppo di strategie di prevenzione e mitigazione efficienti.

In questo lavoro sarà trattato il rilascio di un gas infiammabile (metano) a seguito di un evento incidentale su una piattaforma offshore, tramite l'utilizzo di un approccio CFD innovativo chiamato "two-steps". Il suddetto approccio è stato ulteriormente sviluppato e confrontato con l'approccio CFD classico su diversi fronti quali: il costo computazionale, il tempo di calcolo e la qualità dei risultati. Sono state effettuate dunque delle simulazioni dell'evento, al fine di valutare le conseguenze dello stesso in termini di volume di gas totale rilasciato, volume infiammabile rilasciato e area interessata dalla nube di gas.

Il lavoro si pone all'interno di un progetto di portata nazionale commissionato dal MISE (Ministero dello Sviluppo Economico), ed è stato svolto presso il laboratorio SEADOG del Politecnico di Torino, che nasce proprio dalla collaborazione di quest'ultimo con il Ministero in questione.

Di seguito una breve panoramica sui contenuti della tesi.

Il primo capitolo si pone come obiettivo quello di chiarire quali siano gli obiettivi del presente lavoro, e il contesto in cui si cala. Sarà fatta dunque una panoramica della situazione energetica mondiale e poi di quella italiana. Seguirà una breve descrizione delle caratteristiche del Gas Naturale, e delle fasi

che intercorrono tra estrazione e distribuzione. Altre importanti sezioni saranno dedicate alla descrizione degli impianti offshore e alla situazione italiana in questo ambito. Infine si faranno dei cenni ai concetti base dell'analisi di rischio, dei modelli usati per studiare eventi incidentali di rilascio di sostanze e in particolare dei diversi approcci che si possono avere nell'effettuare un'analisi CFD a riguardo.

Nel secondo capitolo sarà effettuato uno studio dell'incidente di rilascio sfruttando l'approccio two-steps tramite l'utilizzo del concetto di source box. Sarà illustrato il metodo proposto per "accoppiare" i risultati ottenuti dalla simulazione della fase iniziale di rilascio effettuata nel dominio source box e la simulazione della seconda fase del rilascio all'interno della piattaforma. Infine vi sarà un'applicazione di tale metodo su un caso specifico.

Il terzo capitolo è una presentazione dei risultati ottenuti dalla procedura illustrata nel capitolo due, con un'analisi critica degli stessi.

Nel quarto capitolo è presentata una simulazione di Benchmark nella quale è trattato lo stesso fenomeno del capitolo due ma con un approccio a uno step; saranno dunque illustrate tutte le difficoltà incontrate e le scelte effettuate per realizzare tale simulazione.

Nel quinto capitolo saranno discussi i risultati ottenuti dalla procedura illustrata nel capitolo quattro, con considerazioni riguardo la difficoltà di implementazione e i tempi di calcolo. Inoltre sarà effettuato un confronto con i risultati ottenuti con l'approccio a due step.

Nel sesto capitolo verranno presentate le conclusioni e i possibili sviluppi futuri che si potranno avere a partire da questo lavoro, per perfezionare il modello CFD e per fare un passo avanti nello sviluppo dell'analisi di incidenti analoghi a quello studiato.

Capitolo 1 CONTESTO

Ancora ad oggi gli idrocarburi rappresentano una fonte irrinunciabile per il soddisfacimento del fabbisogno energetico italiano, data la rinuncia alla fonte nucleare e il trascurabile apporto delle fonti rinnovabili al soddisfacimento del carico di base. La ricerca e lo sviluppo del settore Oil&Gas dunque occupano ancora oggi ruolo importante per diversi motivi oltre quelli prima citati, tra i quali giocano un ruolo importante il consolidamento delle tecnologie annesse e una certa disponibilità di fonti. Una quota importante di tale fonte deriva dalle piattaforme offshore site a largo delle nostre coste in quanto sono presenti significativi quantitativi di gas naturale, soprattutto in Basilicata e Calabria. Alcuni vantaggi dei combustibili fossili sono:

- facilità di stoccaggio e trasporto;
- alto rapporto energia/volume;
- costo relativamente basso.

Il lato negativo di tali fonti però è legato soprattutto all'aspetto ambientale; infatti sono altamente inquinanti, causano l'aumento dell'effetto serra e come è ben noto non sono rinnovabili in quanto la loro "generazione" avviene su una scala temporale di milioni di anni, assai più lenta del rateo di consumo umano. Lo sviluppo tecnologico degli ultimi decenni ha però reso possibile una drastica riduzione dell'impatto negativo di questi impianti sull'ambiente, rendendoli molto meno dannosi di una decina di anni fa.

Un altro aspetto controverso, verso il quale la sensibilità di tutti va aumentando di giorno in giorno è quello legato alla sicurezza degli impianti; riferendoci al nostro caso, ovvero quello di una piattaforma offshore, le conseguenze di un incidente potrebbero essere devastanti in quanto si ha a che fare con ingenti quantità di sostanze infiammabili e tossiche. A parte l'effetto devastante che può avere un'esplosione e un susseguente incendio di tali sostanze, esiste un altro terribile fenomeno legato alla dispersione ad esempio di petrolio in mare, ovvero l'impatto sull'ecosistema marino intaccato, nonché sui volatili che interagiscono con la superficie del mare.

Per tutti questi motivi negli ultimi anni le istituzioni del caso hanno deciso di prendere delle decisioni più drastiche riguardo la messa in sicurezza di tali impianti, ponendo l'attenzione su una più approfondita analisi di rischio nel settore Oil&Gas. Viene così emanata la "DIRETTIVA 2013/30/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO" del 12 giugno 2013 sulla sicurezza delle operazioni in mare nel settore degli idrocarburi e che modifica la direttiva 2004/35/CE [1] che tra gli obiettivi principali pone:

"L'obiettivo della presente direttiva è di ridurre per quanto possibile il verificarsi di incidenti gravi legati alle operazioni in mare nel settore degli idrocarburi e di limitarne le conseguenze, aumentando così la protezione dell'ambiente marino e delle economie costiere dall'inquinamento, fissando nel contempo le condizioni minime di sicurezza per la ricerca e lo sfruttamento in mare nel settore degli idrocarburi, limitando possibili interruzioni della produzione energetica interna dell'Unione e migliorando i meccanismi in caso di incidente"

e ancora riguardo alle migliorie da apportare alla fase di analisi di rischio:

"Tali migliori pratiche richiedono anche una valutazione della probabilità e delle conseguenze e, pertanto, del rischio di incidenti gravi, nonché delle misure necessarie a prevenirli e delle misure necessarie per la risposta alle emergenze nel caso in cui dovesse tuttavia verificarsi un incidente grave."

In Italia ci si è unificati alla suddetta direttiva tramite il “DECRETO LEGISLATIVO 18 agosto 2015, n. 145” [2], il quale si riferisce, tra le tante voci, a:

“incidente grave: in relazione a un impianto o a infrastrutture connesse”

che viene definito come:

- 1) un incidente che comporta un’esplosione, un incendio, la perdita di controllo di un pozzo o la fuoriuscita di idrocarburi o di sostanze pericolose che comportano, o hanno un forte potenziale per provocare, decessi o lesioni personali gravi;*
- 2) un incidente che reca all’impianto o alle infrastrutture connesse un danno grave che comporta, o ha un forte potenziale per provocare, incidenti mortali o lesioni personali gravi;*

che è il caso considerato nell’ambito di questo progetto.

La Direzione Generale per la Sicurezza – Ufficio Nazionale Minerario per gli Idrocarburi e le Georisorse (DSG UNMIG del Ministero dello Sviluppo Economico) ha volto il proprio sguardo all’adempimento delle indicazioni contenute nel decreto riguardo la maggiore attenzione da porre alla questione della sicurezza; a tal proposito nasce il “Network per la sicurezza offshore”:

“una realtà scientifica altamente specializzata e dinamica che si occupa di sviluppare risultati applicativi per il miglioramento della sicurezza delle attività minerarie ed energetiche a mare” [3]

Il DSG UNMIG ha sviluppato un programma tra le cui linee guida compaiono [3]:

- miglioramento della conoscenza e del monitoraggio delle attività anche attraverso l’innovazione tecnologica;*
- definizione di procedure e best practices nel settore della sicurezza delle attività minerarie ed energetiche;*

Nell’ambito del suddetto programma nasce la collaborazione tra il MISE e il Politecnico di Torino; il 7 giugno 2018 è stato firmato un accordo [4] che preveda la nascita di un polo multidisciplinare per la crescita della ricerca in ambito della sicurezza offshore, il SEASTAR (Sustainable Energy Applied Sciences, Technology & Advanced Research):

“SEASTAR intende porsi come riferimento internazionale sul tema della sicurezza oil&gas, in particolare offshore, e della gestione di questo ambito nella transizione verso un futuro low-carbon” [4].

In particolare la DGS UNMIG, nell’accordo col Politecnico di Torino, si avvarrà dell’appoggio del SEADOG (Safety & Environmental Analysis Division for Oil & Gas), ovvero un laboratorio interdipartimentale (sono coinvolti infatti: DENERG, DIATI e DISAT) di ricerca che ha raggiunto l’obiettivo di definire delle linee guida per la valutazione dei rischi e cercherà di fornire una maggiore conoscenza delle questioni legate alla sicurezza della produzione da giacimenti di idrocarburi situati a mare.

Questo lavoro di tesi si colloca nell’ambito dell’analisi di rischio in ambiente offshore, ed in particolare nella fase di “analisi delle conseguenze”, ovvero della valutazione del danno di un rilascio incidentale di gas infiammabile in piattaforma. Verranno effettuate delle simulazioni di incidenti tramite fluidodinamica computazionale (CFD), dunque il metodo scelto è quello di tipo predittivo tramite analisi numerica di un rilascio incidentale che rappresenti un “major accident” [5], che serva a comprendere quanta sostanza di gas infiammabile si possa liberare e come questa possa disperdersi

all'interno della piattaforma.; sarà importante capire le potenzialità di questo strumento, per poi arrivare alla creazione di un modello ibrido parametrico/CFD che garantisca una buona accuratezza nella predizione e che dia la possibilità di contenere i costi di realizzazione di nuovi impianti assicurando un alto livello di sicurezza degli stessi [6].

La grande difficoltà in questo specifico caso sta nel fatto che una piattaforma è un apparato molto complesso composto da numerosi componenti e caratterizzato da spazi confinati che portano all'avere alti gradienti di velocità e pressione; per cui una simulazione CFD in tale dominio potrebbe presentare problemi di convergenza ed essere molto onerosa in termini di tempo e potenza di calcolo. Come per ogni modello sarà necessario ovviamente che avvenga un processo di “Verification & Validation” (V&V) e a tal proposito un laboratorio nel quale verranno eseguite delle prove sperimentali è in via di costruzione. Alcuni studi di supporto per la progettazione di quest'ultimo sono stati effettuati nei lavori di tesi di A. Tortora [7], il quale ha studiato tramite la CFD le condizioni fluidodinamiche cui è soggetta la piattaforma, (condizioni da ricreare in laboratorio) e N. Bono [8] il quale si è occupato del modello fisico in scala della piattaforma, definendo dimensioni, scelta del gas di rilascio e altri parametri funzionali.

Questo lavoro di tesi si pone come obiettivo quello di approfondire la conoscenza in ambito di simulazioni CFD di rilasci incidentali di gas infiammabili da ambienti in pressione (tubazioni, tank...), e la sua susseguente dispersione nell'ambiente in analisi ovvero un *deck* di una piattaforma di produzione di Gas Naturale, e cerca di trovare un punto di congiunzione tra gli approcci CFD “two steps” e “one step” di cui si spiegheranno le caratteristiche nel paragrafo: 2.2 Approcci semi-empirici e CFD. Nel prossimo paragrafo saranno presentati in dettaglio gli obiettivi.

1.1 Obiettivi della tesi

Il problema affrontato in questo lavoro è stato quello di studiare un metodo alternativo a quelli tipicamente usati in ambito di analisi di rischio, per la valutazione delle conseguenze relative ad un incidente che coinvolga il rilascio di un gas infiammabile. Nello specifico si è analizzato il rilascio accidentale di gas metano in una piattaforma offshore; sono state fatte delle ipotesi per trattare tale situazione, ad esempio tra le principali troviamo:

- rilascio da un foro in una pipeline;
- presenza di un ostacolo (un'altra pipeline) molto vicino;
- portata in uscita esclusivamente di CH₄ trascurando percentuali di altri gas che potrebbero essere presenti;
- rilascio nel deck di produzione della piattaforma;
- pavimentazione del deck di tipo plated, dunque impenetrabile al gas;
- presenza di vento;
- posizione del rilascio più sfavorevole possibile in base alle condizioni di vento (la nube investirà gran parte della piattaforma).

Lo strumento adottato per trattare tale caso è la CFD che, come spiegato in “2.2 Approcci semi-empirici e CFD” è stato preferito ai classici approcci semi-empirici per diversi motivi; tale strumento è stato usato per valutare delle grandezze di interesse come il volume totale di gas rilasciato, il volume di gas infiammabile rilasciato e le aree lambite dal gas.

Il primo obiettivo che ci si è posto è stato quello di portare avanti lo sviluppo di un modello CFD innovativo chiamato “*two steps*”, nel quale, come sarà spiegato nel dettaglio in “2.2.1 Source Box nell’approccio “*two steps*””, il fenomeno viene scisso in due fasi, una prima che riguarda ciò che accade nei primi centimetri del rilascio, ed infatti viene simulata in un dominio ridotto chiamato “*source box*” (vedi Capitolo 2) e una che riguarda la rimanente parte, simulata sulla piattaforma. La prima fase e la seconda differiscono soprattutto per la natura dei fenomeni fisici coinvolti, e per comodità saranno indicate con i termini “rilascio” e “dispersione”. Le basi di questo modello sono state poste in diversi lavori precedenti, alcuni dei quali esposti anche in un convegno internazionale ([9][10]); in particolare il punto di partenza di questo lavoro è rappresentato dai lavori di C. Rupolo [11] ed E. Carrozza [12]; il primo si è occupato di sviluppare un modello accurato della fase di rilascio, in cui siano modellizzati in maniera fedele i fenomeni fisici tipici di un rilascio di gas compresso, la seconda invece ha trattato la fase di dispersione, studiando una mesh adeguata della piattaforma e dei modelli indicati per il tipo di moto del gas.

Il presente lavoro si pone esattamente all’interfaccia dei due appena citati, cercando di dare delle indicazioni su come “far comunicare” le due fasi in maniera veloce, efficiente e precisa in modo da avere dei risultati quanto più affidabili possibile per i propositi di un’analisi di rischio e che comportino dei tempi di modellazione e calcolo compatibili con essa. Dunque l’obiettivo principe è quello di riuscire ad estrapolare i dati di interesse dal dominio dello step uno e renderli utilizzabili nello step due realizzando un “*coupling*” accurato delle due fasi.

Un altro aspetto importante che è stato indagato è la sensibilità della soluzione rispetto alla precisione con cui sono dati alla fase due i valori estrapolati dal primo step, con l’obiettivo di capire se effettivamente serva effettuare un *coupling* accurato o se basti estrapolare dei valori medi dei risultati della fase di rilascio da dare in input alla dispersione. Per fare ciò è stato condotto uno studio di sensitività in cui sono state effettuate diverse simulazioni in cui i parametri di input sono dati in maniera differente a partire da distribuzioni uniformi fino ad arrivare a profili molto dettagliati; i

risultati ottenuti dalle suddette simulazioni sono stati poi analizzati e sono state messe a confronto diverse grandezze di interesse: il volume totale di metano rilasciato, quello entro i limiti di infiammabilità e le aree interessate dalla nube di infiammabile, per vedere se e come le varie approssimazioni introdotte (utilizzando valori medi o discretizzazioni grossolane) possano inficiare la veridicità del risultato introducendo sottostime pericolose o inutili sovrastime.

L'ultimo obiettivo, molto ambizioso, è stato quello di provare a realizzare una simulazione con approccio classico, ovvero one-step, dello stesso caso studio affrontato con l'approccio two-steps, con il fine di mettere a confronto i due approcci su diversi piani come: il costo computazionale, il tempo di calcolo a parità di macchina usata, la fattibilità a parità di "raffinatezza" della mesh e la soluzione.

1.2 Situazione energetica nel mondo ed in Italia

Tutt'oggi il ruolo degli idrocarburi rimane fondamentale per soddisfare il fabbisogno mondiale di energia. La crescita delle fonti rinnovabili rimane condizionata all'impossibilità di svincolare domanda e offerta e di accumulare con buona efficienza l'energia prodotta da tali fonti; la fonte nucleare combatte ancora con i problemi di accettazione sociale e con i limiti tecnologici; il carbone (nonostante gli evidenti effetti negativi a livello ambientale), il petrolio (in tutte le sue forme raffinate) e il gas naturale segnano invece delle crescite sensibili e costanti negli anni:

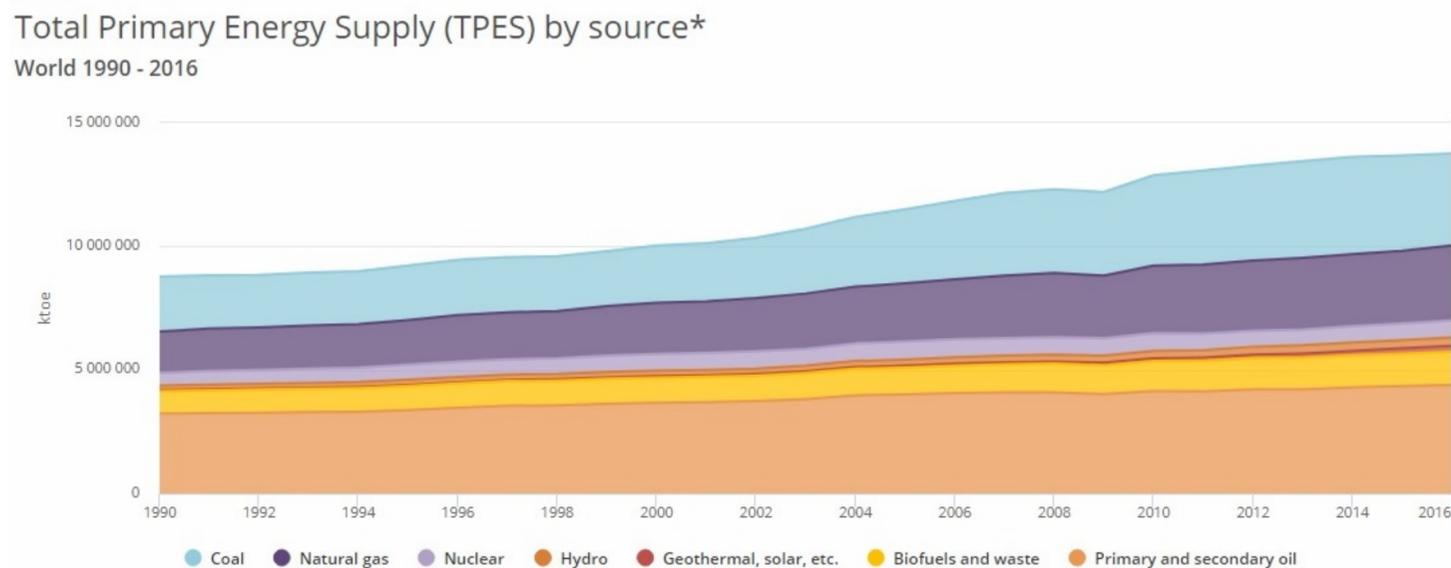


Figura 1.1 Fabbisogno energia primaria totale [13]

In Figura 1.1. possiamo vedere come negli ultimi 40 anni circa, la domanda sia notevolmente aumentata; inoltre è interessante sottolineare che il ruolo del gas naturale è diventato più rilevante negli anni, principalmente a scapito del petrolio (anche se insieme soddisfano più del 50 % del fabbisogno mondiale). In Figura 1.2 si possono notare inoltre la comparsa delle fonti rinnovabili, la lieve ma sensibile crescita del nucleare, i cui apporti rimangono però trascurabili, e la costanza nel settore del carbone.

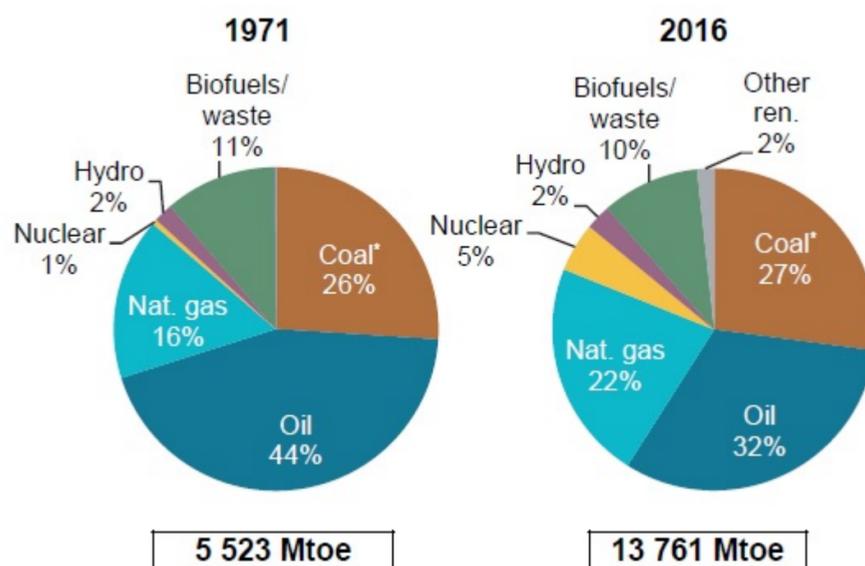


Figura 1.2 Fabbisogno energia primaria per combustibile [14]

Il ruolo del petrolio rimane fondamentale nel settore dei trasporti, per distacco è il combustibile più utilizzato come si può vedere in Figura 1.3.

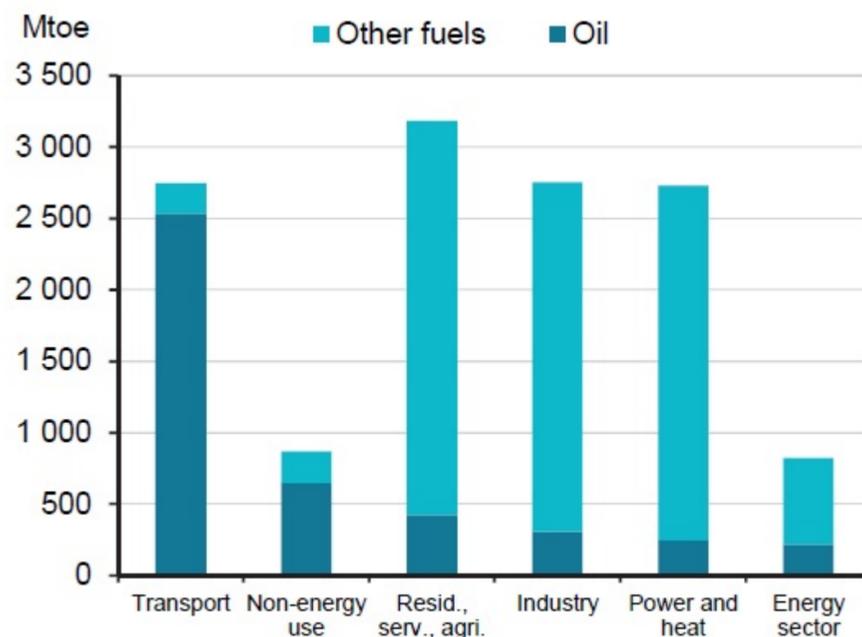


Figura 1.3 Consumo mondiale di petrolio ed altri combustibili nel 2016 [15]

Il ruolo del Gas Naturale, nel mondo e in Italia, verrà ora analizzato più nel dettaglio, in quanto riguarda più specificamente il nostro ambito di studio. Nel 2017 la produzione di gas naturale a livello globale ha raggiunto il record di 3768 Bcm (Billions cubic metres) [16] segnando un incremento del 3.6 % rispetto al 2016. In Figura 1.4 possiamo notare come negli ultimi 60 anni circa la produzione di gas naturale sia andata aumentando in maniera consistente nei paesi facenti parte dell'OCSE (Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico, in inglese OECD), in cui è compresa anche l'Italia:

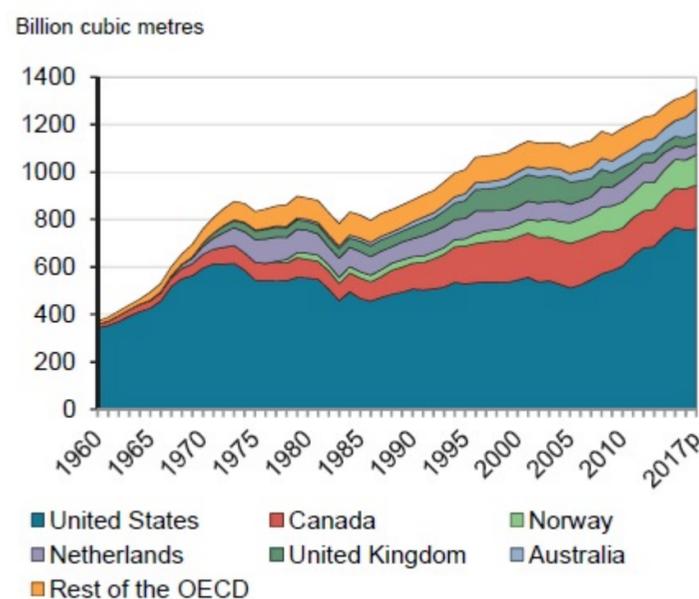


Figura 1.4 Produzione gas naturale nei paesi dell'OCSE [16]

In particolare in Italia, come si evince dal “Bilancio Energetico Nazionale 2016” (ben 2016) di cui si presentano alcuni dati significativi in Tabella 1.1, l'unica fonte a segnare un aumento di consumo interno lordo percentuale rispetto all'anno precedente è proprio il gas naturale [17].

Disponibilità e impieghi	Variazione percentuale 2016/2015					
	Solidi	Gas naturale	Petrolio	Rinnovabili	Energia elettrica	Totale
Produzione	-19,2 %	-14,6 %	-31,5 %	-1,1 %	0	-7 %
Importazione	-12,3 %	6,7 %	1,3 %	-1,1 %	-15,1 %	0,7 %
Esportazione	-2,6 %	-3,9 %	5,5 %	100 %	37,6 %	6,8 %
Consumo interno lordo	-10,1 %	5 %	-1,9 %	-1,5 %	-20,2 %	-1,3 %

Tabella 1.1 ben 2016

L'importanza di tale fonte nel nostro paese porta alla necessità di avere degli strumenti di modellazione e valutazione del rischio efficienti per impianti che gestiscono gas infiammabili e tossici; lo scenario che si è scelto di analizzare rientra proprio in questo ambito, si tratta di un rilascio incidentale di gas metano da una tubazione in pressione in una piattaforma. Dunque di seguito saranno riportate alcune caratteristiche del combustibile in questione nonché alcune delle fasi cui viene sottoposto dall'estrazione fino alla distribuzione.

1.2.1 Gas Naturale

Al pari di petrolio e carbone il gas naturale è un combustibile fossile, che si forma a seguito di un processo chiamato “mineralizzazione”; la sua composizione è variabile, ma i principali idrocarburi che lo compongono sono:

- Metano (CH₄);
- Anidride Carbonica (CO₂);
- Azoto (N₂);
- Idrogeno Solforato (H₂S).

e in alcuni casi vi sono anche tracce di Elio, Radon e Cripton. Per rendere tale miscela pronta all'utilizzo vi deve prima essere un trattamento atto ad eliminare componenti poco infiammabili quali anidride carbonica e azoto, e componenti tossici e corrosivi come l'idrogeno solforato; alla fine del trattamento la miscela sarà costituita essenzialmente da metano, questo giustificherà la scelta di imporre una concentrazione di CH₄ pari a uno nel punto di rilascio nelle simulazioni che verranno presentate più avanti. Il fatto che il metano sia più leggero dell'aria fa sì che possa diffondersi in maniera molto rapida e omogenea (non ci sono fenomeni di stratificazione al suolo ad esempio) il che rende ancora più difficile predire quale possa essere il suo moto durante un rilascio, identificare zone a maggiore concentrazione, soprattutto in presenza di vento (come accadrà nel caso qui trattato). Un altro aspetto che lo rende particolarmente difficile da “identificare” è il fatto che sia inodore, incolore e non tossico. In una fase di analisi di rischio tramite simulazioni CFD riguardante un incidente di rilascio catastrofico, bisognerà valutare la concentrazione di tale gas in aria, considerando che per infiammarsi la sua concentrazione deve essere compresa tra il 5 % e il 15 %. [18].

Prima che sia pronto all'utilizzo o più frequentemente allo stoccaggio, vi sono diverse fasi cui viene sottoposto [19]:

- Estrazione;
- Trattamento;
- Trasposto;
- Stoccaggio;
- Distribuzione.

La fase di ricerca del gas naturale non è scissa da quella del petrolio in quanto tutti e due sono frutto di trasformazioni di sostanze organiche depositate sui fondali marini, per cui esiste un'unica fase di ricerca degli idrocarburi, e solo in seguito alla fase di esplorazione si può capire di quale tipo è il giacimento. Si possono avere due diverse situazioni:

1. Il gas naturale è disciolto nel petrolio, o costituisce uno strato soprastante;
2. Vi è quasi esclusivamente gas;

Nel primo caso si parla di "Gas associato", e nel secondo di "Gas non associato"; per **estrarlo** basta perforare il deposito, e date le alte pressioni esso esce fuori da solo dunque bisognerà solo "guidarlo" verso l'impianto.

Il **trattamento** cui deve essere sottoposto dipende dalle caratteristiche del gas di un particolare giacimento; se questo è "umido", ovvero contiene propano, butano, etano, deve avvenire una separazione dei vari componenti. La separazione è possibile sfruttando la temperatura critica del metano che essendo molto più bassa permette di liquefare gli altri componenti e prelevarli, per poi stocarli in bombole e venderli. Un altro passaggio fondamentale è la "depurazione" da impurità come lo zolfo, che è una delle cause principali di inquinamento dell'ambiente tramite piogge acide.

Il **trasporto** può avvenire in due modi:

- Tramite gasdotti;
- Tramite navi metaniere.

Nel primo caso ingenti quantità di gas vengono trasportati direttamente dal produttore al consumatore; seppur appaia indubbiamente il modo migliore per trasferire il gas, i gasdotti presentano alcune criticità soprattutto legate all'impatto ambientale e alla sicurezza; nella loro realizzazione entrano in gioco tutti questi fattori oltre alla fattibilità tecnico-economica. È necessario che il condotto non costituisca dunque un pericolo per l'ecosistema in cui è calato e non sia soggetto a fenomeni di erosione etc. per questo vengono effettuate radiografie sulle saldature, assicurando che non si verifichino lenti e deboli rilasci. Qualora invece, le distanze da coprire fossero troppo lunghe o ci fossero impedimenti per la costruzione di un metanodotto, allora il gas viene portato a -161 gradi centigradi, liquefatto e trasportato con navi metaniere. Il trasporto è reso abbastanza efficiente dal fatto che allo stato liquido il volume si riduce di un fattore 600, così una nave arriva a trasportare anche 78 milioni di metri cubi di gas, che allo stato liquido sono 131000 metri cubi [19]. Il GNL viene poi scaricato in un apposito terminale dove una volta scaldato ritorna allo stato gassoso e può essere inviato alle varie destinazioni di consumo. Uno dei grandi vantaggi del metano consiste nel fatto che può essere facilmente **stoccato** sfruttando giacimenti esausti, rendendo possibile in questo modo di seguire la variabilità della richiesta che come sappiamo essere maggiore in inverno che in estate.

Un sistema di stoccaggio comprende varie infrastrutture:

- Giacimento esaurito;
- Impianto di trattamento del gas;
- Impianti di compressione;
- Sistemi di dispacciamento operativo.

Vi sono diversi tipi di stoccaggio:

- Convenzionale: vengono sfruttati giacimenti di produzione di gas esauriti o semiesauriti;
- Semiconvenzionale: vengono sfruttati giacimenti di olio esauriti o acquiferi;
- Speciale: si sfruttano miniere di carbone abbandonate o cavità derivanti da formazioni saline sotterranee.

In Italia vi sono circa 10 siti di stoccaggio per una capacità totale di 15 miliardi di metri cubi. Infine il metano viene **distribuito** tramite numerose tubazioni di allacciamento che si diramano dalla rete di trasporto nazionale, consentendo così un collegamento tra industria ed abitazione. Tra i vari aspetti di sicurezza coinvolti c'è anche quello legato alla possibilità di riconoscere immediatamente una perdita di gas da parte di un utente, proprio per questo la sostanza prima di essere immessa in circolazione viene “odorizzata”, ovvero viene mescolata con i così detti “mercaptani”, sostanze dall'odore molto forte. È importante inoltre comprendere quali potrebbe essere l'impatto ambientale durante le fasi di trasporto e distribuzione [19]:

- Perdite incontrollate: ad oggi i metanodotti sono sottoposti a continuo monitoraggio e a controlli della pressione, per cui eventuali fuoriuscite sono segnalate da appositi sistemi di rilevamento;
- Perdite di acqua e gasolina depositate sul fondo delle tubazioni.

I principali utilizzi del gas naturale sono sicuramente legati alla produzione dell'energia elettrica (cicli a vapore, centrali a turbogas, centrali a ciclo combinato) e l'autotrazione; un utilizzo innovativo e di grande interesse invece è quello nel campo della cogenerazione.

Tra i vantaggi di questo combustibile ci sono sicuramente quelli legati all'impatto ambientale e alle sconfinite riserve; i vantaggi ambientali sono:

- Emissioni CO₂ inferiori del 25% rispetto alla benzina, del 16 % rispetto al Gpl, del 30 % rispetto al Diesel e del 70 % rispetto al carbone [19];
- I prodotti della combustione non contengono particelle carboniose, benzene e PM10.

Per quanto riguarda le riserve, sono stimate essere sufficienti per i prossimi 60-70 anni e quasi tutte concentrate nel Golfo Persico [19]; inoltre gli “idrati di metano” potrebbero essere la fonte di energia del futuro poiché da un solo metro cubo di questi ultimi si possono ottenere circa 160 – 180 m³ di metano gassoso. Secondo [19], sui fondali marini e nelle zone di permafrost sono presenti più di 100000 milioni di miliardi di m³ di metano sotto forma di idrati. Ma per sfruttare questo tipo di riserve è necessario che la tecnologia faccia diversi passi avanti; per ora, infatti, non è possibile estrarre metano dagli idrati senza che non ne venga persa una gran quantità.

1.2.2 Piattaforme offshore

La continua crescita della richiesta di energia ha portato naturalmente alla ricerca di nuove riserve di idrocarburi, e negli ultimi anni l'esplorazione si è spostata nelle zone marine in cui si ipotizza siano presenti enormi giacimenti da sfruttare. Storicamente si può collocare l'inizio dell'estrazione del petrolio all'inizio del ventesimo secolo nella costa settentrionale della California, anche se la tecnologia usata era analoga a quella usata su terraferma. La tecnologia "offshore" conosce i suoi albori negli anni 50 e in Europa la prima estrazione di petrolio si ha nel 1959 nei pressi della costa di Gela mentre quella di gas un anno dopo a Ravenna. Una spinta decisiva nello sviluppo della tecnologia offshore si ha negli anni 70 a seguito della scoperta di importanti giacimenti nel Mare del Nord e nel Golfo del Messico [20]. Ad oggi la "zona" che si stima possa offrire molto è quella nota come "acque profonde" (profondità maggiori di 1000 m), infatti, secondo [21], "il 30 % della produzione di idrocarburi proviene proprio da settori di estrazione offshore".

Una struttura offshore cerca di riprodurre in mare le condizioni di lavoro di una struttura onshore, ovvero l'obiettivo è fare in modo che l'estrazione avvenga nella più totale sicurezza. I suddetti impianti possono essere così classificati:

- Impianti di perforazione;
- Impianti di produzione.

I primi hanno lo scopo di perforare pozzi esplorativi e, solo qualora si ritenga che la riserva sia abbastanza cospicua da giustificare l'inizio dell'estrazione, si procede con il progetto di un impianto di produzione che avrà l'obiettivo di estrarre e poi trattare gli idrocarburi.

A seconda della profondità a cui devono lavorare e alle condizioni climatiche cui sono sottoposte, le piattaforme si suddividono in due macro-categorie: fisse e galleggianti.

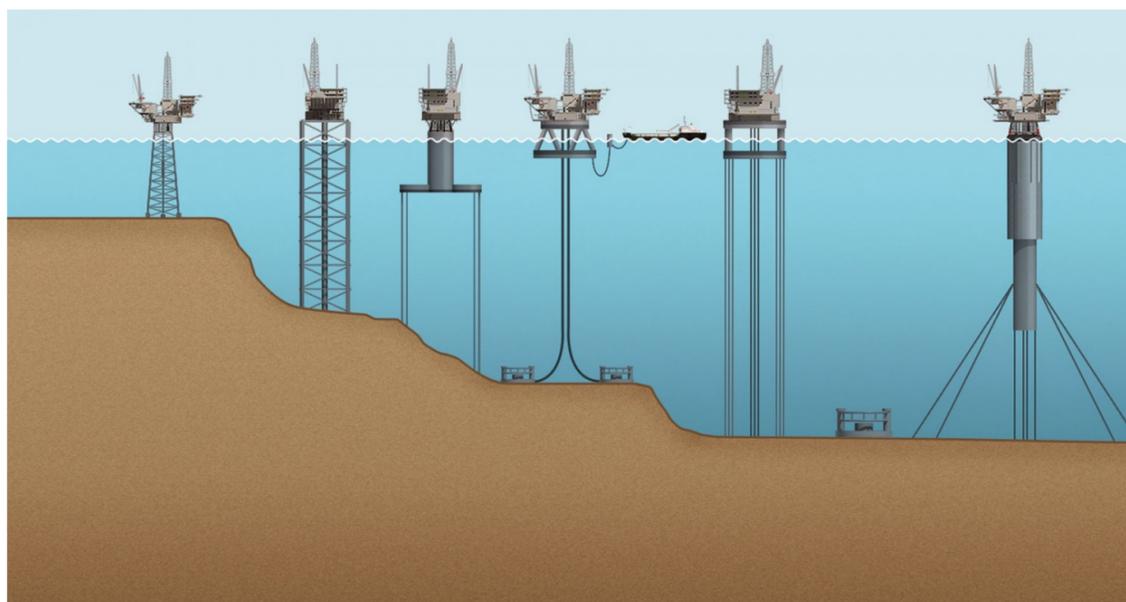


Figura 1.5 Tipi di piattaforme offshore [22]

In Figura 1.5 si possono vedere i profili di diversi tipi di piattaforme, da sinistra a destra:

- Fixed Platform (FP) fino a 1500 piedi;
- Compliant Tower (CT) da 1500 a 3000 piedi;
- Sea Star (SStar) da 500 a 3500 piedi;
- Floating Production Systems (FPS) da 1500 a 6000 piedi;
- Tension Leg Platform (TLP) da 1500 a 7000 piedi;

- Sub sea System (SS) fino a 7000 piedi;
- SPAR Platform (SP) da 2000 a 10000 piedi.

Tutte queste tipologie condividono, nella loro parte emersa, determinati componenti:

- Helideck: Piattaforma per il decollo e l'atterraggio di elicotteri per il trasporto del personale e per le emergenze;
- Gru: usate per caricare e scaricare merci;
- Alloggi per il personale;
- Battelli di evacuazione del personale dell'impianto;
- Gruppi elettrogeni per l'energia elettrica a bordo;
- Torre di perforazione: elemento fondamentale nelle strutture di perforazione, ma non sono sempre presenti nelle piattaforme di produzione.

Le piattaforme a struttura fissa (Figura 1.6) sono utilizzate in presenza di fondali poco profondi (300 – 400 m), infatti in queste condizioni è possibile ancorarla al fondale tramite una struttura di sostegno rigida senza che essa sia sottoposta a eccessivi sforzi meccanici ed evitando che la piattaforma sia soggetta al moto ondoso. La struttura di supporto, “jacket”, è composta da tubi in acciaio ancorati al fondale marino nella parte inferiore, mentre sono fissati ad un “deck” nella parte superiore; un deck è un piano sul quale si trovano l'impianto di perforazione, i vari sistemi di trattamento degli idrocarburi, gli alloggi, sistemi ausiliari ecc. Queste caratteristiche permettono alla piattaforma di lavorare per lunghi periodi sotto condizioni meteorologiche e marine ostili, ma possono essere usate fino ad una profondità di battente d'acqua di 400 m, poiché è sconsigliato avere quel tipo di supporto nel caso di acque molto profonde [21].

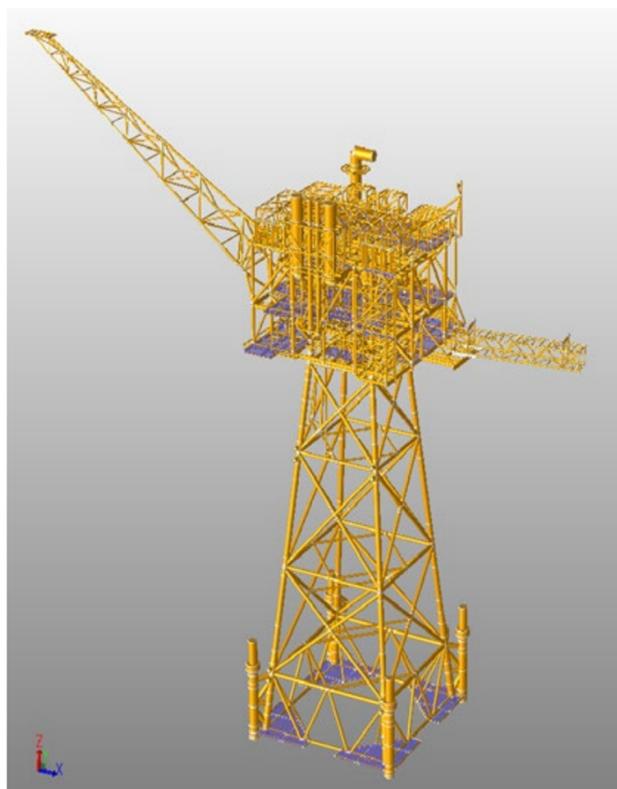


Figura 1.6 Piattaforma fissa [23]

Tipicamente questo tipo di piattaforma è sprovvista di sistemi di stoccaggio dunque vi devono essere dei sistemi di trasporto degli idrocarburi al suolo. Nel caso di gas si usano dei condotti che collegano

piattaforma e terraferma, nel caso di liquidi vengono usate delle navi che possono essere di diverso tipo:

- FSO: se è presente solo la possibilità di stoccaggio a bordo;
- FPSO: se è presente sia il sistema di stoccaggio che quello di trattamento.

Se il fondale appare essere impraticabile per una struttura del genere, ad esempio se vi sono numerose increspature nelle rocce, l'alternativa è una "struttura a gravità" come quella illustrata in Figura 1.7 in confronto con una fissa, ovvero un sistema che sfrutta la sua enorme mole per rimanere ancorata al fondale; la parte "differente" consiste nella base, che è di larghe dimensioni e molto massiccia, e nella struttura di supporto che è costituita da enormi colonne in cemento armato [24].

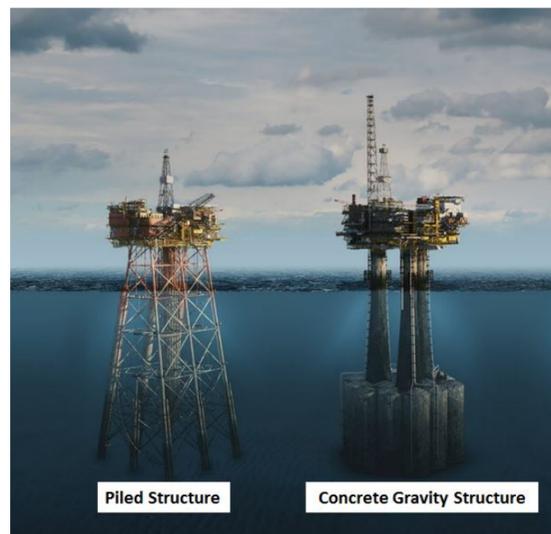


Figura 1.7 Piattaforma fissa vs Struttura a gravità [25]

Quando invece si ha a che fare con profondità comprese tra i 300 e i 900 m, la realizzazione di una struttura fissa risulta difficoltosa, per cui vengono utilizzate le cosiddette Compliant Tower (CT). La caratteristica peculiare di queste strutture è che riescono a resistere molto bene ai carichi laterali poiché sono in grado di flettersi; come si può vedere in Figura 1.8 sono caratterizzate da una torre stretta e flessibile ancorata al fondale, costruita in cemento armato o acciaio che funge da supporto per i vari decks.

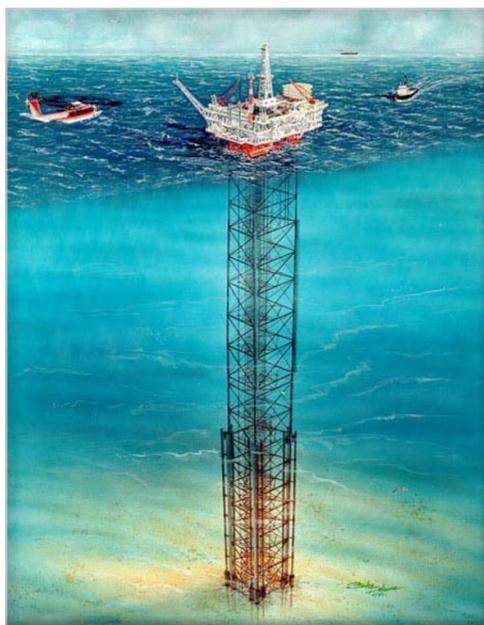


Figura 1.8 Compliant Tower [26]

Per profondità fino a 1500 metri vengono invece usate strutture galleggianti, chiamate “Tension Leg Platform” (TLP) (Figura 1.9). In questo caso la piattaforma è ancorata al fondale tramite tiranti (catene) di acciaio che garantiscono una buona resistenza al moto ondoso, condizione fondamentale per avere la stabilità necessaria sui piani superiori in cui si svolgono le operazioni. Ogni gruppo di catene è chiamato appunto “Tension Leg” ed è caratterizzato da un’alta rigidità assiale, che fa sì che la piattaforma possa muoversi orizzontalmente ma non possa oscillare in alcun modo.

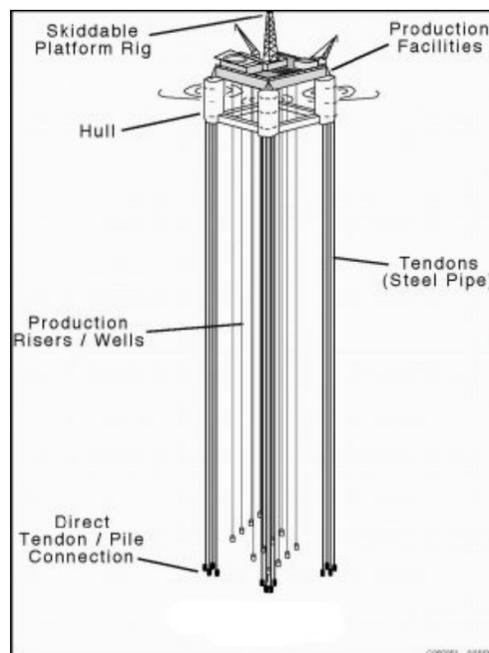


Figura 1.9 TLP [27]

Se i fondali che si vogliono esplorare e/o sfruttare sono più profondi di quelli sopra citati, allora l’utilizzo di una piattaforma a struttura galleggiante è indispensabile [28]. I principali sistemi di produzione galleggianti sono tre:

1. Piattaforma SPAR: il componente principale è un cilindro galleggiante “di circa 25 metri di diametro e alta 200-250 m, che galleggia in assetto verticale” [28], che contiene il sistema di stoccaggio e sostiene le apparecchiature necessarie per estrazione e trattamento;
2. Floating Production System (FPS): molto simile ad un impianto o nave di perforazione, viene tenuta in posizione da un sistema di ancoraggio fatto di catene. Non ha la possibilità di stoccare il prodotto;
3. Floating Production Storage and Off-loading System (FPSO): in questo caso si tratta di un sistema in grado di trasportare sulla terraferma ciò che è stato prelevato; è dotato di grandi stive per lo stoccaggio ed è utilizzato laddove ci si trovi in presenza di giacimenti modesti ma molto profondi.

I decks di una piattaforma fissa costituiscono il corpo della stessa, in essi si trovano le apparecchiature per l’estrazione e la separazione di acqua, petrolio e gas (estrattori, separatori, sistemi di pompaggio, separazione e produzione dell’olio, sistema di compressione del gas, ecc.) e i vari sistemi di sicurezza atti a proteggere o prevenire come sensori e sistemi, come l’antincendio e il sistema di drenaggio. Sulla superficie della piattaforma è posizionata la testa di pozzo (Figura 1.10), componente che svolge varie funzioni tra cui il controllo continuo sulla pressione durante le operazioni.

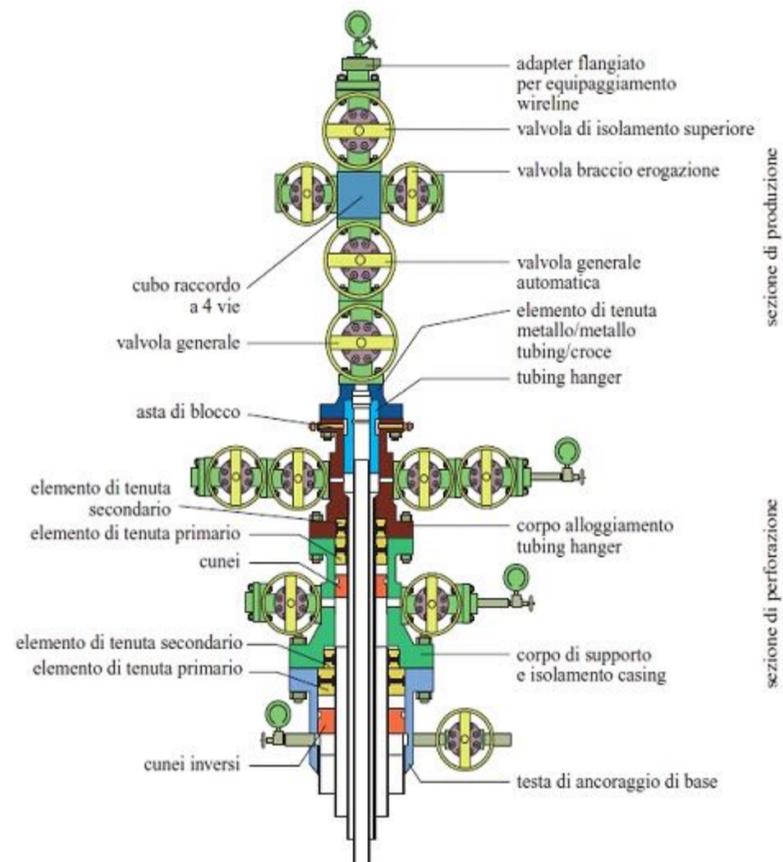


Figura 1.10 Testa di pozzo [29]

In Figura 1.11 si possono vedere i decks, tipici di una piattaforma fissa.



Figura 1.11 Barbara C [30]

Essi sono aperti e dunque esposti al vento. Sono separati l'uno dall'altro da pavimentazioni che possono essere a griglia o solide garantendo un maggiore isolamento tra i vari piani evitando che sostanze pericolose invadano gli altri piani; nel primo caso il pavimento è di tipo "grated", mentre nel secondo caso "plated", ovviamente la scelta di una configurazione o l'altra influenzerà molto il fenomeno di dispersione in caso di rilascio accidentale di gas e dipende dalle modalità di gestione della sicurezza adottate.

A seconda del fatto che una piattaforma estragga petrolio o gas la scelta della pavimentazione è diversa; nel caso del petrolio è preferibile avere una griglia per evitare la formazione di pozze mentre

nel caso di gas è meglio cercare di evitare che questo diffonda negli altri piani per cui una configurazione di tipo plated sembra più conveniente.

Poiché in Italia le piattaforme sono principalmente adibite all'estrazione di gas, la configurazione più comune è quella con pavimento solido, per questo, nel presente lavoro, si è scelta questa ultima configurazione come dominio di calcolo per le simulazioni CFD (vedi 2.4.3 Caratteristiche generali delle simulazioni).

1.2.3 Sicurezza in ambiente offshore

In una piattaforma offshore vengono trattate principalmente sostanze pericolose, ovvero infiammabili e/o tossiche, per cui l'analisi di rischio pone la sua attenzione principalmente su queste sostanze poiché un loro rilascio incidentale può causare ingenti danni ad ambiente e/o personale. Appare dunque fondamentale installare adeguati sistemi di monitoraggio e rilevamento per prevenire e/o mitigare incidenti di grossa portata, i cosiddetti "major accidents". Nello specifico le sostanze in questione sono ovviamente gli idrocarburi, petrolio o gas naturale a seconda del caso. Con riferimento ad una piattaforma di estrazione di gas naturale ci sono principalmente quattro specie chimiche gassose che possono essere rilasciate:

- metano (CH_4): può avvenire un rilascio di metano qualora vi sia una rottura di serbatoi o tubazioni ad alta pressione o pressione ambiente;
- Solfuro di idrogeno (H_2S): questo gas è tipicamente già contenuto nei pozzi di gas naturale ed è estremamente tossico che ad alte concentrazioni può causare incoscienza in pochi minuti, mentre a concentrazioni più basse può irritare occhi e gola; un'esposizione a 800 ppm può provocare la morte in 5 minuti;
- Monossido di Carbonio (CO): si origina dalla combustione ed è altamente pericolosa in quanto è molto più affine all'emoglobina rispetto all'ossigeno; legandosi all'emoglobina forma carbossiemoglobina e dunque l'ossigeno non è più messo in circolo, portando nei casi peggiori a ipossia anemica;
- Biossido di Carbonio (CO_2): si genera analogamente al CO , ed è pericoloso solo qualora si trovi in concentrazioni molto alte.

La situazione è resa ancora più complicata dalla geometria complessa che caratterizza una piattaforma. Questo ambiente si può definire molto "congestionato", poiché sono presenti numerosi componenti in spazi relativamente ridotti e dunque vi è la possibilità di formazione di zone "chiuse" nelle quali si può avere un accumulo eccessivo di inquinante senza che questo possa essere rilevato.

Nel caso specifico di questa tesi si tratterà solo il gas naturale, considerandone solo il componente principale, il metano (CH_4); il parametro più rilevante in questo caso è "l'intervallo di infiammabilità" entro cui la miscela di combustibile e aria può bruciare e autosostenersi ad una data temperatura e pressione. Esso è delimitato da:

- Low Flammability Limit (LFL) 5 % (in vol.);
- Upper Flammability Limit (UFL) 15 % (in vol.).

In Figura 1.12 si possono vedere alcune voci della classificazione CLP del Gas Naturale [31]:

Labeling according to Regulation (EC) No 1272/2008

Symbol(s)



Signal Words

: Danger

CLP Hazard Statements

: **PHYSICAL HAZARDS:**
H220: Extremely flammable gas.
H280: Contains gas under pressure; may explode if heated.

HEALTH HAZARDS:
Not classified as a health hazard under CLP criteria.

ENVIRONMENTAL HAZARDS:
Not classified as environmental hazard according to CLP criteria.

Labeling according to Directive 1999/45/EC/67/548/EEC

EC Symbols

: F+ Extremely flammable.



EC Classification

: Extremely flammable.

EC Risk Phrases

: R12 Extremely flammable.

EC Safety Phrases

: S9 Keep container in a well-ventilated place.
S16 Keep away from sources of ignition - No smoking.
S33 Take precautionary measures against static discharges.

Figura 1.12 Classificazione CLP Gas Naturale [31]

Date tutte le complessità sottolineate in precedenza e la necessità di prevenire incidenti disastrosi, su una piattaforma offshore sono presenti diversi sistemi di sicurezza ([21][28]):

- Sistema di generazione di emergenza: sostituiscono i generatori primari in caso di malfunzionamento; sono alimentati a gasolio;
- Sistema UPS (uninterruptible Power Supply): qualora neanche i sistemi di generazione d'emergenza funzionino, una serie di batterie alimentano i sistemi principali dell'impianto;
- Sistema di blocco dell'impianto (Production Shut Down): blocca la produzione in caso di incidente;
- Sistema di scarico dell'impianto (Emergency Shut Down): nel caso di piattaforme per il gas, qualora avvenga un incidente, il gas non viene più estratto dai pozzi e quello stoccato viene disperso in atmosfera tramite torce fredde;
- Sistemi di rilevazione e conseguenti sistemi a blocchi: una serie di sensori rileva perdite, presenza di fumo, gas ecc. e avvia l'attivazione di sistemi d'allarme;
- Sistemi di protezione antincendio attiva: protegge tutta la struttura e può essere alimentata da acqua, schiuma, CO₂, gas inerte;
- Sistemi di protezione antincendio passiva: ne fanno parte tutti quei componenti altamente resistenti alle alte temperature, che permettono una lunga resistenza all'esposizione alle fiamme garantendo un elevato grado di stabilità; esempi ne sono muri antideflagranti ed antifiamma;
- Sistemi di evacuazione del personale: scale alla marinara, scialuppe, zattere;
- Sistemi per la sicurezza e la protezione del personale: giubbotti salvagente, maschere antigas, docce per decontaminazione;
- Sistemi di allarme e di telecomunicazione: i primi sono sistemi acustici e visivi che si attivano in caso di emergenza, ed i secondi permettono di contattare il mondo esterno.

1.2.4 Offshore in Italia

I dati relativi alla situazione dell'offshore italiano sono raccolti nei rapporti del MISE secondo i quali attualmente sono presenti 139 piattaforme petrolifere, di cui 9 non attive e 130 così ripartite: 120 di produzione e 10 di supporto [32]. Delle piattaforme di produzione circa il 90 % produce gas, e quindi solo poche producono olio. Le prime contribuiscono per il 10 % al fabbisogno energetico nazionale, mentre le seconde per il 7 %.

Per definire la distribuzione geografica delle piattaforme si possono distinguere due aree:

1. Alto Adriatico (Figura 1.13);
2. Basso Adriatico, Ionio e Canale di Sicilia (Figura 1.14).

Tipicamente si tratta di piattaforme fisse con struttura emersa, e come si può notare in Figura 1.13 la maggior parte delle piattaforme si trova nella prima regione; quest'ultimo dato sarà fondamentale per la scelta di condizioni climatiche medie cui verrà sottoposta la piattaforma sulla quale verrà effettuata l'analisi CFD.

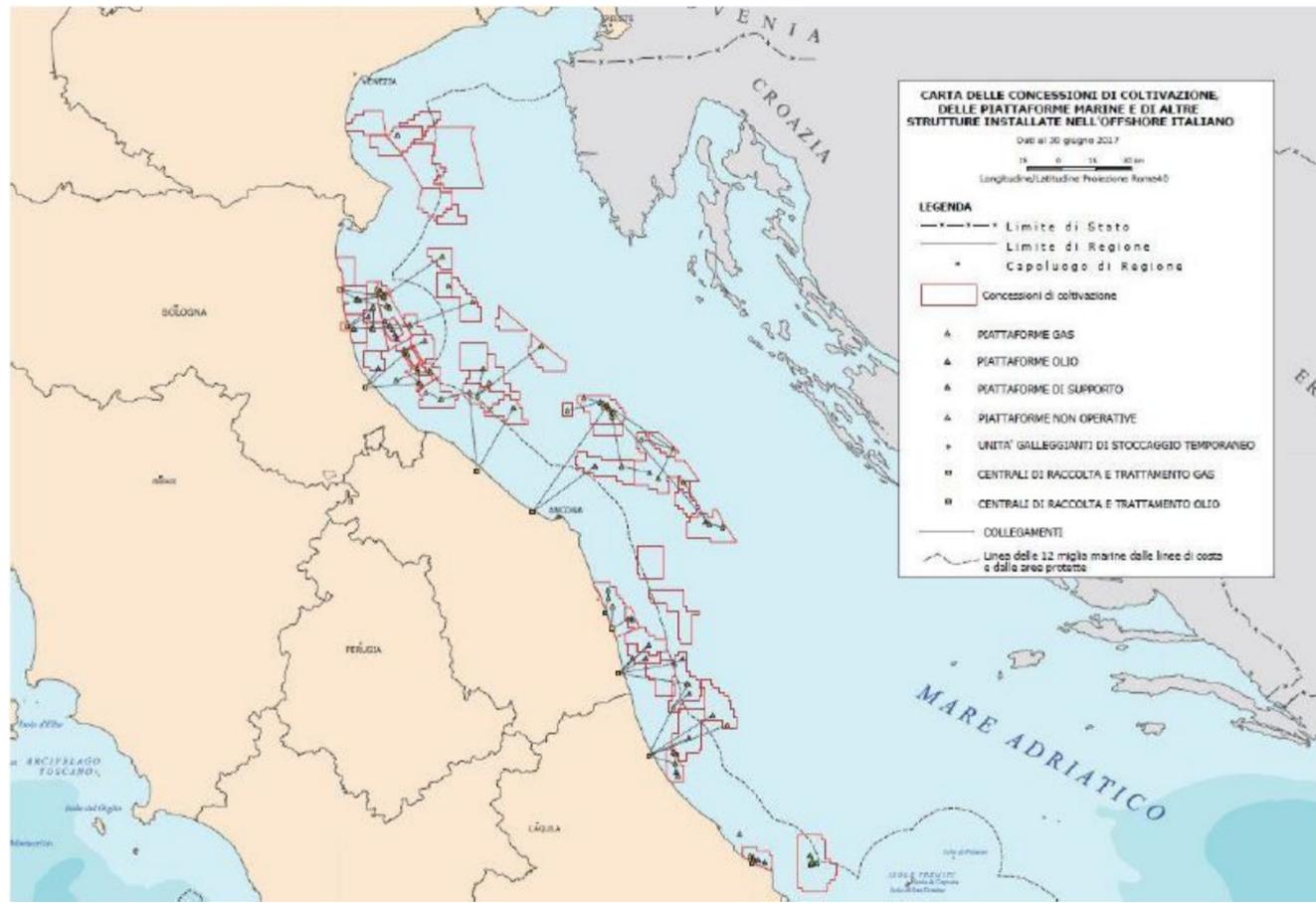


Figura 1.13 Carta Alto Adriatico [32]

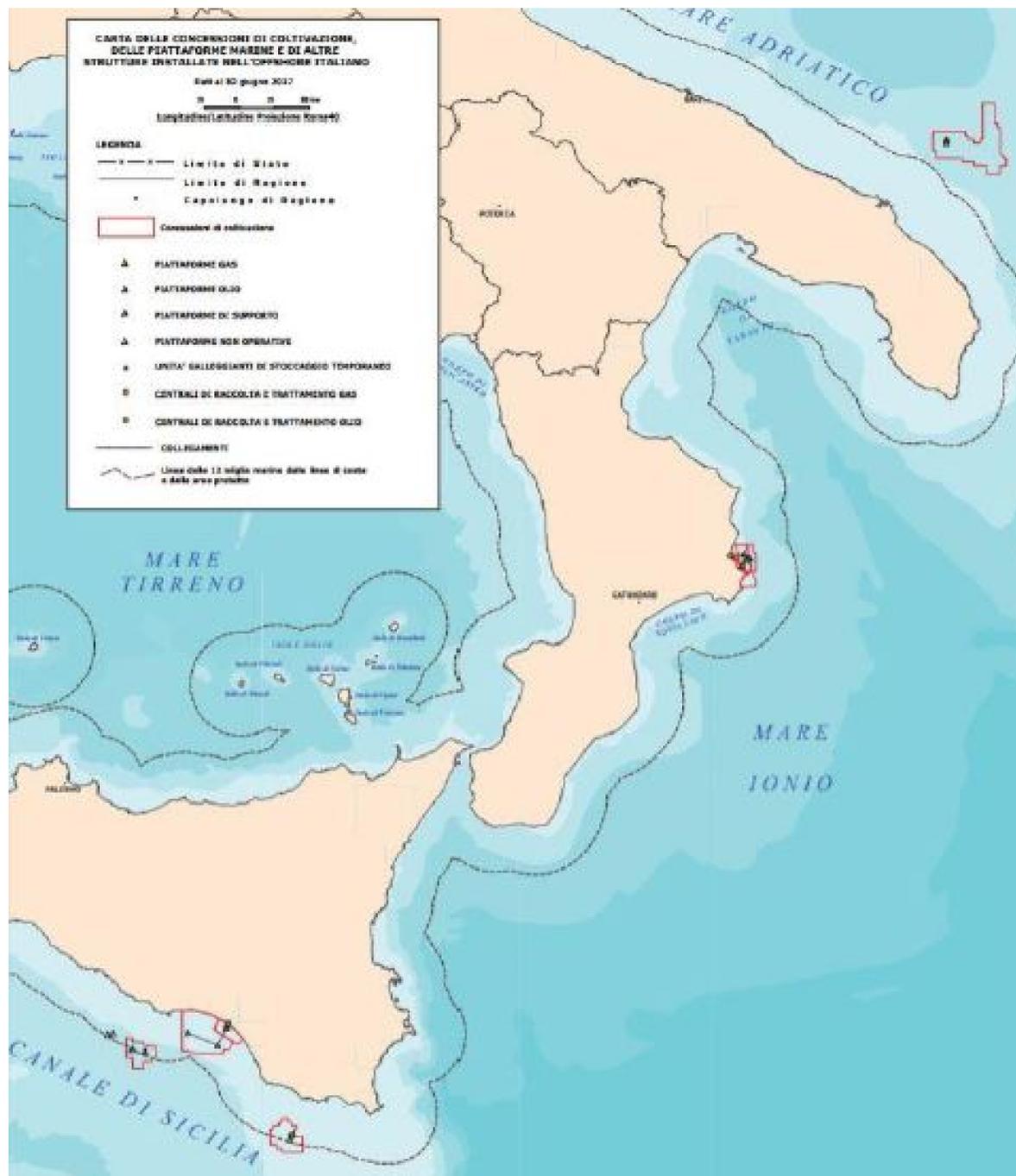


Figura 1.14 Carta Basso Adriatico, Ionio e Canale di Sicilia [32]

E' interessante notare come nell'ultima immagine si veda una linea nera che delimita una porzione di mare intorno alla costa. Questa linea infatti indica una distanza di 12 miglia dalla costa poiché dopo il decreto Ministeriale del 9 agosto 2013 le nuove installazioni devono essere poste oltre questo limite. In Italia attualmente ce ne sono 94 entro il limite.

In Figura 1.15 possiamo vedere la più grande piattaforma ad oggi presente, VEGA A (Edison):

- Altezza: 69 m;
- Profondità fondale: 124 m;
- Dimensioni: 80 x 60 m;
- Numero pozzi allacciati: 20.



Figura 1.15 VEGA A (Edison)

La piattaforma scelta per le analisi è rappresentativa del maggior numero di strutture presenti in Italia e ha le seguenti caratteristiche: struttura emersa a tre decks, di cui quello centrale di produzione (che sarà quello modellizzato ed usato come dominio di calcolo) con pavimentazione solida (plated). Per quanto riguarda la localizzazione geografica è stata scelta una regione a largo delle stazioni meteorologiche poste a Ravenna Punta Marina e Ancona Boa. Queste informazioni sono fondamentali per modellizzare al meglio la geometria del dominio e le condizioni al contorno da imporre nel software.

1.3 Analisi di rischio

L'analisi di rischio è una disciplina nata negli anni '60 in ambito nucleare ed aerospaziale, ma che ha conosciuto negli anni seguenti una rapida espansione in numerosi ambiti, industriali e non. Nasce come metodologia per identificare e quantificare i rischi relativi ad un determinato sistema, di tipo industriale, domestico, ecc.

Il processo con cui viene eseguita tale analisi consta di diverse fasi; innanzitutto devono essere identificati i punti deboli del sistema, per capire quali eventi incidentali potrebbero accadere nel

normale svolgimento dell'attività, dopodiché bisognerà quantificare le conseguenze annesse, ovvero il danno che un determinato incidente potrebbe causare; infine devono essere definite delle misure di prevenzione e mitigazione degli effetti.

In generale si identifica un *evento iniziatore*, che può essere dettato da un errore umano, un malfunzionamento del sistema o un evento esterno, dopodiché si analizzano le varie sequenze di eventi che possono verificarsi costruendo diverse *sequenze incidentali*; ogni sequenza incidentale inizia dall'evento iniziatore e si può concludere con un incidente più o meno grave a seconda di quanti e quali sistemi di sicurezza hanno fallito, oppure con la buona riuscita della messa in sicurezza. Gli eventi che accadono nel mezzo possono avere un effetto positivo o negativo, ad esempio il buon intervento di un sistema di sicurezza dà un apporto positivo, mentre la presenza di una scintilla in caso di un rilascio di gas infiammabile darà un apporto negativo.

Ad ognuna di queste sequenze viene attribuita una frequenza **f** di accadimento, probabilità che un evento accada in un certo arco di tempo ed infatti si misura in [eventi/anno], e un danno **D** generato, che può essere rivolto a:

- Persone;
- Ambiente;
- Reputazione dell'azienda coinvolta;
- Struttura.

Definiti la frequenza e il danno di una determinata sequenza si può valutare il rischio **R** in questo modo [5]:

$$R = f \times D$$

che si misura in [danno/anno].

La percezione del rischio però non è del tutto oggettiva, l'opinione pubblica tendenzialmente è più sensibile nei confronti di determinati incidenti; vi possono essere dunque incidenti poco frequenti il cui danno però generare una preoccupazione particolare nelle persone facendo sì che questo evento, seppur poco frequente, sia percepito come molto più negativo di un evento ad alta frequenza ma con un danno modesto. Perciò la precedente formula può essere modificata introducendo un esponente (**k**) al danno in modo tale da decidere quale peso abbia quest'ultimo nella valutazione del rischio:

$$R = f \times D^k$$

dove $k \geq 1$.

Lo scopo finale dell'analisi è quello di valutare se il rischio calcolato sia o meno accettabile.

Si possono identificare due fasi macroscopiche nella procedura di analisi:

- Valutazione *qualitativa*: in questa fase si identificano e selezionano tutte le possibili sorgenti di pericolo, con un approccio sistematico;
- Valutazione *quantitativa* QRA (Qualitative Risk Assessment): questa fase si applica alle situazioni più critiche in cui è necessario quantificare numericamente il rischio fare un confronto con valori di riferimento e determinarne l'accettabilità.

Una volta determinata l'inaccettabilità del rischio si può procedere in due modi: si interviene sulla frequenza cercando di diminuirla con provvedimenti preventivi, oppure si cerca di limitare il danno con interventi mitigativi.

In Figura 1.16 è illustrato uno schema riassumendo quanto detto finora.

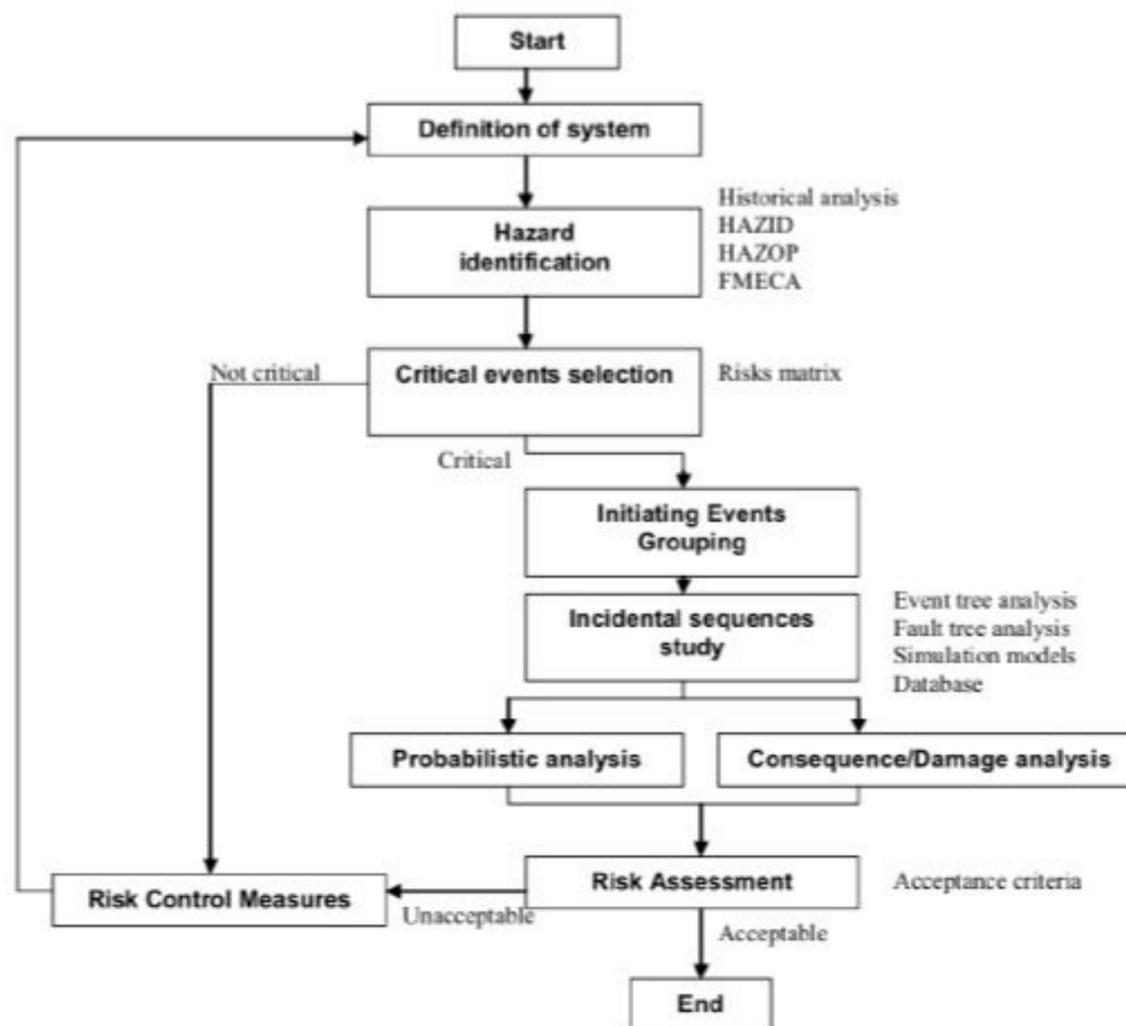


Figura 1.16 Schema procedura analisi di rischio

Il caso analizzato in questo lavoro rientra tra gli incidenti più gravi che possano accadere in ambito industriale; si tratta infatti di un rilascio di gas infiammabile in ambiente offshore. Questo evento è catalogato come “**incidente grave**”, di cui si possono avere delle definizioni dalla direttiva 2013/30UE del parlamento europeo e del consiglio del 12 giugno 2013 [1] (norma di riferimento per la prevenzione di incidenti gravi in ambiente Oil&Gas):

“1) «incidente grave»: in relazione a un impianto o a infrastrutture connesse:

a) un incidente che comporta un’esplosione, un incendio, la perdita di controllo di un pozzo o la fuoriuscita di idrocarburi o di sostanze pericolose che comportano, o hanno un forte potenziale per provocare decessi o lesioni personali gravi;

b) un incidente che reca all’impianto o alle infrastrutture connesse un danno grave che comporta, o ha un forte potenziale per provocare, incidenti mortali o lesioni personali gravi;

c) qualsiasi altro incidente che provoca la morte o lesioni gravi a cinque o più persone che si trovano sull’impianto in mare in cui ha origine il pericolo o sono impegnate in un’operazione sull’impianto in mare nel settore degli idrocarburi o sulle infrastrutture connesse o in collegamento con tale impianto e tali infrastrutture;

d) qualsiasi incidente ambientale grave risultante dagli incidenti di cui alle lettere a), b) e c).
Al fine di stabilire se un incidente costituisce un incidente grave a norma delle lettere a), b) o d), un impianto che è di norma non presidiato è considerato come se fosse presidiato”.

Poiché si tratterà un caso di incidente grave, in quanto il rilascio in questione riguarda un gas infiammabile, l'approccio più indicato per analizzare il caso è quello quantitativo (QRA), infatti guardando la Figura 1.17 possiamo dire che l'evento si colloca nella zona rossa.

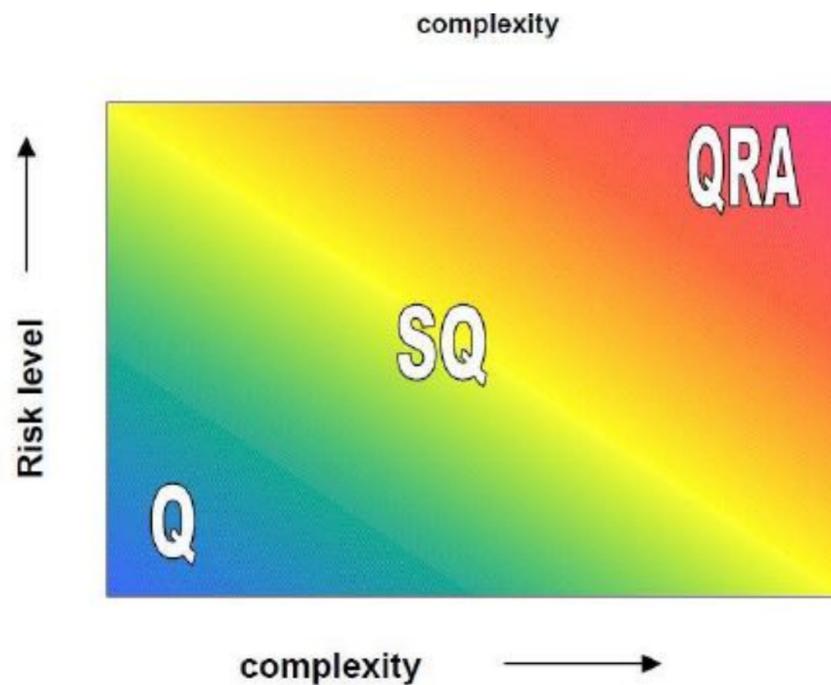


Figura 1.17 Metodologia analisi di rischio

Una parte molto importante della QRA riguarda la simulazione degli incidenti per la valutazione del danno; esistono diversi metodi per valutare il danno, i più usati sono i modelli parametrici in quanto riescono a considerare il fenomeno fisico coinvolto e sono veloci e semplici ma hanno lo svantaggio di non tener presente la reale geometria del problema, e di essere eccessivamente conservativi.

Il presente lavoro si inserisce nella fase di valutazione del danno appunto; saranno stimate le quantità di gas totali e quelle nei limiti di infiammabilità rilasciati in piattaforma e si valuteranno le zone lambite dalla nube di gas. Il metodo scelto per affrontare il problema è quello dell'analisi CFD, a scapito dei modelli parametrici; tale scelta sarà giustificata nel paragrafo 2.2 Approcci semi-empirici e CFD.

Capitolo 2 ANALISI CFD DI UN RILASCIO DI GAS INFIAMMABILE

Il capitolo si apre con dei richiami ai fenomeni fisici che caratterizzano un rilascio di gas compresso in un ambiente caratterizzato da presenza di ostacoli e ai principali approcci e modelli possibili per trattare tale situazione. Si spiegheranno le ragioni della scelta di adottare come strumento la fluidodinamica computazionale, sulla quale saranno fatti dei richiami, e della quale saranno analizzati vantaggi e criticità. Sarà descritto un innovativo approccio CFD, detto “*two steps*”, del quale si farà uso in questa sezione della tesi e di cui si spiegherà il significato in 2.2. La parte più corposa del capitolo sarà invece dedicata ad uno dei temi centrali della tesi ovvero lo studio sulla possibilità di accoppiare in maniera funzionale le due fasi del suddetto metodo, cercando di effettuare un “*coupling*” quanto più accurato possibile. Sarà poi condotto uno studio di sensitività dei risultati rispetto alla “accuratezza” con cui può essere effettuato tale coupling. Infine verrà condotta un’analisi dei risultati ottenuti.

2.1 Fisica del problema

Il problema affrontato è un rilascio di gas metano in pressione in un deck di una piattaforma offshore; per capire come trattare tale situazione è utile descrivere le caratteristiche fisiche del problema.

Prima di tutto è utile elencare i parametri e le caratteristiche principali del rilascio:

- Pressione di rilascio (p_{ril}): 10 bar;
- Pressione ambiente circostante (p_{amb}): 1 bar;
- Diametro foro: 1 cm;
- Presenza di ostacoli.

Il primo parametro utile cui fare riferimento è la pressione di rilascio del gas; questo dato è molto importante poiché insieme alla pressione dell’ambiente circostante, definisce il tipo di efflusso che si genera, che in questo caso sarà sonico; per descrivere ciò in formule, possiamo definire il seguente rapporto di pressioni:

$$\frac{p_{amb}}{p_{ril}}$$

se il valore di questo rapporto è inferiore ad un valore detto “*rapporto critico*”, definito come:

$$R = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$$

dove k (~ 1.4 per il metano) è il coefficiente di dilatazione adiabatica dei gas, allora la velocità di uscita del gas sarà pari a quella del suono e l’efflusso si dice sonico, e la pressione di scarico sarà pari a quella critica ($R \times p_{ril}$) maggiore della pressione ambiente. In questo caso, facendo riferimento ai dati sopra elencati e al coefficiente di dilatazione del metano:

$$0.1 \approx \frac{p_{amb}}{p_{ril}} < \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \approx 0.5$$

per cui siamo nel caso di efflusso sonico.

La Figura 2.1 è utile per chiarire cosa si intenda per pressione di scarico e quale sia la differenza con quella ambiente:

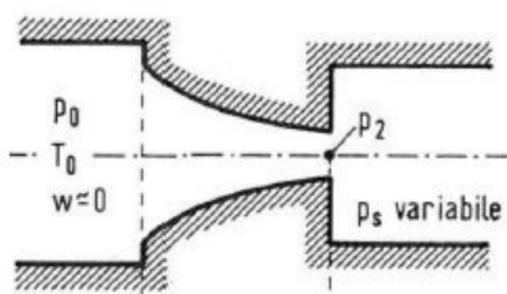


Figura 2.1 Modello di foro rappresentato da un ugello convergente [33]

facendo riferimento alla notazione della precedente figura, p_0 è la nostra p_{ril} , p_2 è la nostra p_{sc} (scarico) e p_s è p_{amb} . Dunque la pressione di scarico è quella che si verifica esattamente sulla sezione del foro.

Un altro importante parametro è il “numero di Mach”, così definito:

$$Ma = \frac{u}{c}$$

dove u è la velocità di efflusso del gas e c è la velocità del suono; in questo caso, efflusso sonico, si ha che $Ma = 1$. Questo parametro è fondamentale per definire un'altra caratteristica del getto, ovvero la comprimibilità. Per valori di $Ma > 0.3$ gli effetti di comprimibilità non sono trascurabili; in questo caso, avendo un dominio molto grande, ci sarà una zona in cui i suddetti effetti non saranno trascurabili ed un'altra in cui si potrà considerare il fluido incomprimibile, poiché avrà lo spazio per rallentare abbastanza.

Possiamo inoltre osservare che, essendo la pressione di scarico: $p_{sc} = R \times p_{ril} \approx 5 \text{ bar} > p_{amb}$ il getto sarà *sottoespanso* ovvero avverrà una ulteriore espansione una volta scaricato in ambiente. Tali getti possono avere diverse strutture a seconda del grado di sottoespansione η_0 così definito [35]:

$$\eta_0 = \frac{p_{ril}}{p_{amb}}$$

Qualora questo fosse inferiore a 4 si avrebbe la struttura rappresentata in Figura 2.2:

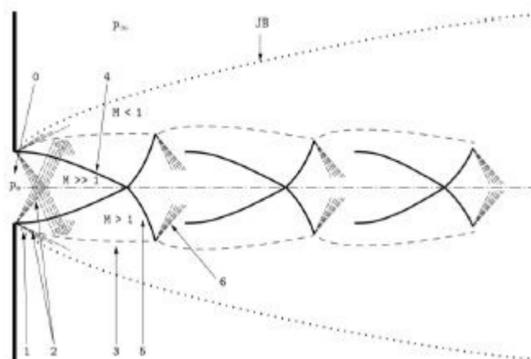


Figura 2.2 Getto sottoespanso moderato

caratteristica di un getto sottoespanso moderato che può essere descritto così:

“La forma tipica è quella “a diamante” in cui si nota l’onda di compressione che, a partire dalla sezione di sbocco, forma delle linee di shock oblique (4) che tendono a convergere verso l’asse del

getto ed al momento della loro intersezione generano un'onda riflessa (5) che contribuisce alla propagazione del fenomeno attraverso la formazione di diverse celle, ovvero delle strutture che rappresentano delle regioni di discontinuità in cui si verifica un brusco cambiamento di densità e velocità del fluido considerato.” [11]

Nel caso invece di $\eta_0 > 7$ [36] si parla di elevato grado di sottoespansione, e la struttura apparirà come da Figura 2.3:

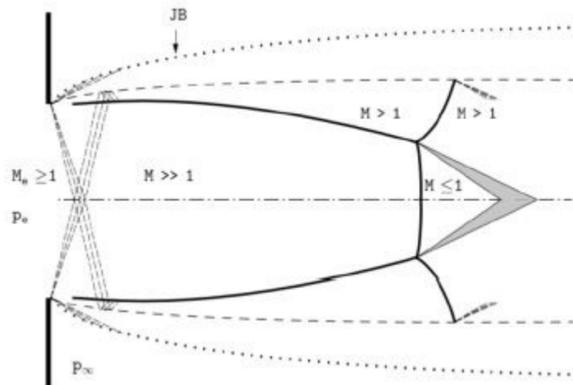


Figura 2.3 Getto altamente sottoespanso

Si può notare in questo caso la formazione di un'unica cella a caratterizzare tutta la zona del *core*. Come si può vedere in Figura 2.3 dopo una certa distanza si ha una transizione da $Ma \gg 1$ a $Ma < 1$ in cui il getto diventa subsonico; in corrispondenza di tale transizione si può vedere come sia presente una linea che delimita le due regioni, essa rappresenta un “*disco di Mach*” ovvero una struttura che rappresenta una discontinuità fluidodinamica per cui la velocità passa bruscamente da regime sonico a subsonico [37].

Un altro aspetto molto importante riguarda la presenza di ostacoli, che in una piattaforma sono molto numerosi, e l'impatto del getto su di essi. Di particolare interesse è l'analisi dell'interazione tra getto turbolento e cilindro, che è il primo ostacolo su cui impatta il getto nel caso presentato nel Capitolo 4, quando ancora la sua velocità è prossima al sonico ed il livello di turbolenza molto elevato, infatti:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \approx 5 \times 10^5$$

superiore al valore del numero di Reynolds che definisce il passaggio da moto laminare a turbolento ($2.5 \cdot 10^5$). In queste condizioni di elevata turbolenza si generano diversi fenomeni nell'interazione getto cilindro visibili in Figura 2.4:

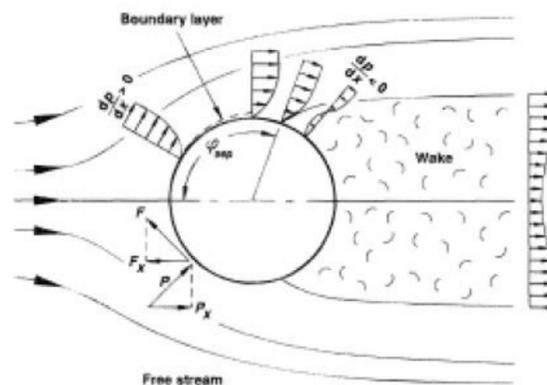


Figura 2.4 Effetti di un getto turbolento che impatta su cilindro [34]

Il contatto fluido cilindro fa sì che si generi uno “*strato limite*” (boundary layer), in cui sarà presente un elevato gradiente di velocità trasversale; il fenomeno si spiega considerando che se si assume una

condizione di “*no slip*”, ovvero di “non scivolamento” del fluido sulla parete del cilindro, la velocità nel punto di contatto sarà zero facendo sì che si generi un gradiente che vada da zero fino al valore di velocità nella zona “non perturbata” dallo strato limite. Un altro fenomeno è legato alla differenza di pressione che si crea tra monte e valle del cilindro; questa fa sì che il flusso tenda ad aderire al cilindro, ma se la turbolenza è troppo elevata, a valle del cilindro si ha il distacco del fluido (distacco di vena fluida) con generazione di vortici secondari subito dietro l’ostacolo.

Data la grandezza del dominio in questione, ovvero una piattaforma lunga 30 m e larga 20 m, tutti i fenomeni prima accennati fanno in tempo ad esaurirsi in uno spazio molto ridotto facendo sì che da un certo punto in poi non si abbiano più fenomeni di comprimibilità e il regime diventi subsonico e le forze d’inerzia diventino rilevanti.

2.2 Approcci semi-empirici e CFD

Innanzitutto è bene ricordare il caso studio in questione: si tratta di un rilascio incidentale di gas metano da una tubazione in pressione (10 bar) da un foro di 1 cm che disperde in un deck di produzione di una piattaforma offshore.

Per trattare un problema del genere si potrebbe pensare di utilizzare dei modelli empirici, che rappresentano la scelta più semplice per ricostruire un’area di pericolo intorno al rilascio; tali metodi garantiscono dei risultati in poco tempo e senza troppi “costi” di calcolo, ma hanno degli aspetti che giocano a loro sfavore. Innanzitutto si basano su un approccio di tipo molto conservativo che può portare ad eccessive sovrastime dei risultati del problema portando ad elevati ed immotivati investimenti di materiale (e dunque peso sulla struttura reticolare) e denaro che invece potrebbero essere ottimizzati. Un altro aspetto controverso è legato al fatto che tali modelli sono stati sviluppati solo per alcuni casi, ad esempio il caso di un getto che impatta su un cilindro non è stato trattato, dunque sarebbe difficile in questo caso trovare dei modelli parametrici adeguati. Quello che più si avvicina al caso in questione è il *TFJ (Turbulent Free Jet)* che però si riferisce a getti liberi ed inoltre ha un campo di applicabilità limitato ad un certo intervallo di validità, il che pone un’ulteriore limitazione; per essere valido infatti bisogna che ci si trovi ad una distanza tale per cui il moto sia completamente sviluppato, ma nel caso trattato si vuole analizzare il fenomeno a partire dal punto di rilascio.

L’unico approccio che sembra essere esaustivo per il presente caso è quello dell’analisi CFD, tramite la quale si possono modellizzare anche i fenomeni microscopici legati all’efflusso di un getto comprimibile e all’impatto con ostacoli. La scelta dunque è legata alla necessità di ottenere risultati molto realistici ed evitare sprechi di risorse nello studio di situazioni molto complicate come quella qui trattata.

All’interno del contesto CFD si possono distinguere diversi approcci: approccio “**one step**” e approccio “**two steps**”; per il caso in questione sembra che l’approccio a two-steps possa essere il più indicato, come suggerisce l’analisi bibliografica svolta a riguardo ([38][39]) dalla quale emerge che il costo computazionale sia più contenuto se si separano due fasi nella simulazione, una prima che coinvolge il rilascio in prossimità del foro e una seconda che tratta la dispersione successiva della nube. Queste due fasi saranno chiamate **rilascio** e **dispersione**. Le due fasi hanno delle caratteristiche sostanzialmente diverse, infatti se nella prima si ha a che fare con un getto comprimibile che fluisce a velocità sonica, nella seconda si hanno velocità dell’ordine dei 10 m/s e si può considerare che il fluido sia incomprimibile; alla luce di queste differenze sostanziali sembra indispensabile modellizzare i fenomeni separatamente in quanto quando si dovranno settare i parametri nel software

di competenza bisognerà fare delle scelte diverse a seconda della situazione. Un'altra questione è legata alla finitura della mesh che dovrà essere molto maggiore nel caso del rilascio poiché sono coinvolti fenomeni fisici microscopici, mentre nel caso della dispersione si può adottare una mesh più grossolana poiché il fenomeno è macroscopico. Nel Capitolo 4 si cercherà di affrontare un approccio one-step, in cui si evidenzieranno appunto tutte queste criticità. Il punto di congiunzione tra le due fasi del metodo two-steps sarà il concetto di source box che si spiegherà in 2.2.1 Source Box nell'approccio "two steps".

2.2.1 Source Box nell'approccio "two steps"

La "*source box*" [40] è il dominio in cui avviene la fase di rilascio dell'approccio two-steps. Al suo interno si trova il getto supersonico di gas e si assume che entro di essa si esauriscano i fenomeni di comprimibilità, garantendo che all'esterno si possa modellare il fluido come incomprimibile. A seconda che si tratti un getto libero o un getto che impatta su un ostacolo, all'interno di essa può essere presente un corpo che rappresenta l'eventuale ostacolo.

La forma è stata studiata precedentemente [41] e la scelta consigliata è quella cubica. Per quanto riguarda la lunghezza il fattore determinante è la distanza entro cui si può ritenere che gli effetti di comprimibilità siano esauriti; per calcolare questa distanza diversi autori, tra cui [42], propongono una formula secondo cui gli effetti di comprimibilità svaniscono dopo una distanza pari a 10 volte quella in cui si forma il primo disco di Mach. La formula in questione vale per il getto libero, ed è la seguente:

$$L_{SB} = 10 \times 0.645 \times d_{foro} \times \sqrt{p_{rilascio}}$$

in cui si può vedere come essa sarà tanto più lunga quanto più ampio sarà il foro o alta la pressione di rilascio.

Il modello di source box può essere applicato a rilasci di gas pressurizzato da vari componenti come: serbatoi, valvole, flange, ecc. ma in questo specifico caso si tratterà un rilascio che avviene da una pipeline contenente metano; si considera che il getto vada poi ad impattare dopo una breve distanza su un altro tubo adiacente. La scelta si giustifica considerando che in ambito offshore sono molto frequenti i banchi di tubi disposti in parallelo, per cui è molto probabile avere un getto che impatta su una tubazione vicina.

La source box, che da ora indicheremo con SB per comodità, è caratterizzata dunque da diversi parametri, che ora saranno elencati:

- Diametro del foro (la cui scelta è basata su analisi probabilistiche sulla frequenza delle fessurazioni);
- Forma dell'ostacolo (dettata dalla scelta di voler analizzare il caso di rottura su una di due pipelines che corrono in parallelo, con getto che vada ad impattare proprio la tubazione adiacente);
- Diametro dell'ostacolo, se si tratta di un cilindro (la scelta può essere effettuata basandosi sui diametri tipici delle tubazioni);
- Distanza dell'ostacolo (scelta basata sui valori medi di distanza tra tubi di uno stesso banco.);
- Direzione del getto;
- Pressione di rilascio.

I parametri cui si fa riferimento in questo lavoro sono ripresi da un lavoro di tesi precedente [11] per avere continuità nel lavoro di ricerca, dunque la giustificazione delle scelte è stata trattata nel suddetto lavoro di tesi. In Tabella 2.1 sarà presentato ora un breve resoconto dei parametri selezionati:

Forma SB	Cubica
Lato SB	46 cm
Diametro foro	1 cm
Forma dell'ostacolo	Cilindrica
Diametro dell'ostacolo	10 cm
Distanza dell'ostacolo	10 cm
Direzione del getto	Perpendicolare all'asse dell'ostacolo
Pressione di rilascio	10 bar

Tabella 2.1 Caratteristiche source box

Per capire meglio quale sia il ruolo della SB all'interno del metodo in Figura 2.5 possiamo visualizzare con un diagramma il processo.

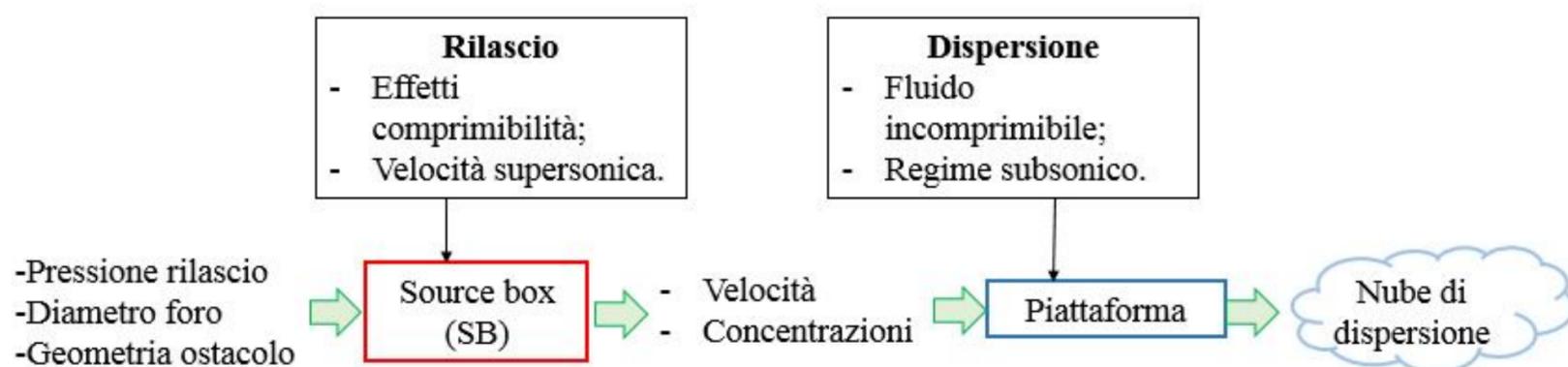


Figura 2.5 Diagramma di flusso metodo two-steps

Come possiamo vedere, ci sono dei parametri che definiscono la prima fase, il rilascio, che avviene nella SB; in questa fase si assume che il fluido sia comprimibile; successivamente i dati di velocità e concentrazioni vengono estrapolati e usati come input per lo step due, la dispersione, che viene simulata nel dominio “piattaforma” con l’assunzione di fluido incomprimibile, effetti di gravità rilevanti ecc. Al termine abbiamo la nube di dispersione da cui estrapolare i dati di volume di infiammabile rilasciato e tutti i parametri d’interesse.

Riprendendo delle immagini di [11], possiamo vedere il rilascio che avviene da una tubazione e va a colpire quella adiacente in Figura 2.6.

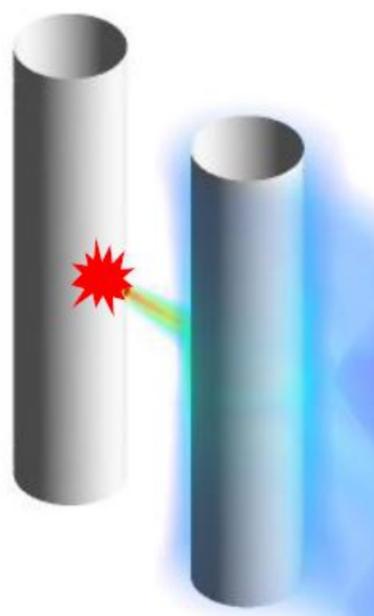


Figura 2.6 Getto incidente su pipeline

In Figura 2.7 si può vedere una ricostruzione CAD 3D delle due tubazioni con la SB in trasparenza intorno a quella che verrà colpita dal getto; in Figura 2.8 si può vedere la SB evidenziata in rosso per capire meglio quale volume occupi.

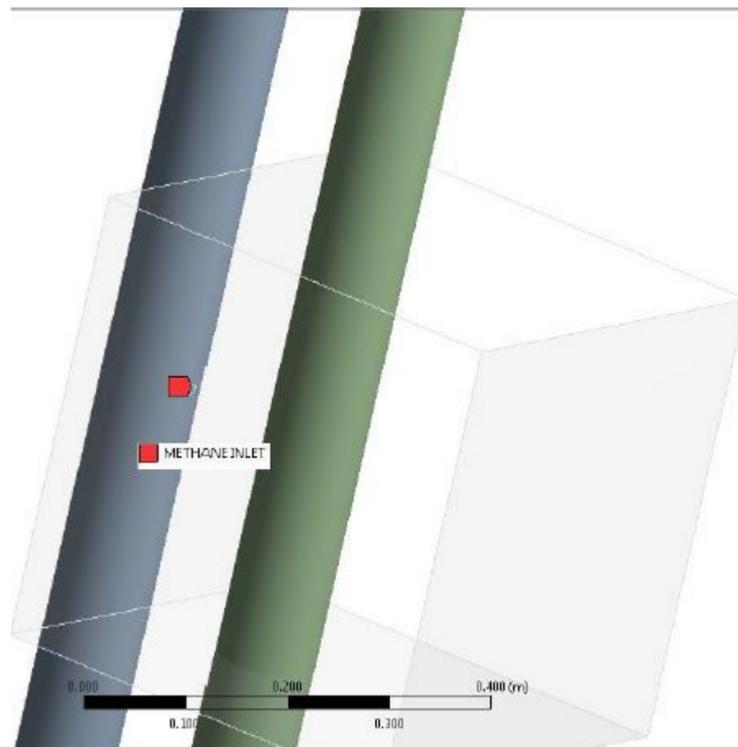


Figura 2.7 Punto di rilascio su pipeline

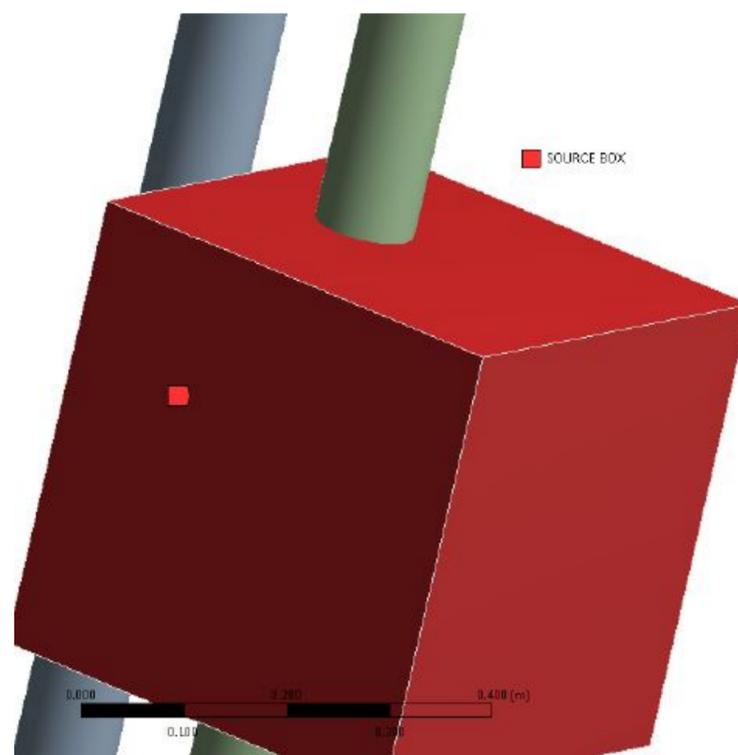


Figura 2.8 Source box e pipelines in parallelo

Questa “scatola” rappresenta la source box, ovvero il dominio in cui è simulato il rilascio; alla fine della simulazione si avrà una certa distribuzione del gas infiammabile sulle sue superfici, dalle quali si estrapoleranno le informazioni utili per effettuare la simulazione di dispersione; si può dire che sia una “black box” dal punto di vista dello step due. In Figura 2.9 la vediamo nel contesto della piattaforma; la posizione della SB dipende ovviamente dal punto in cui avviene la rottura e il conseguente rilascio che si vuole studiare.

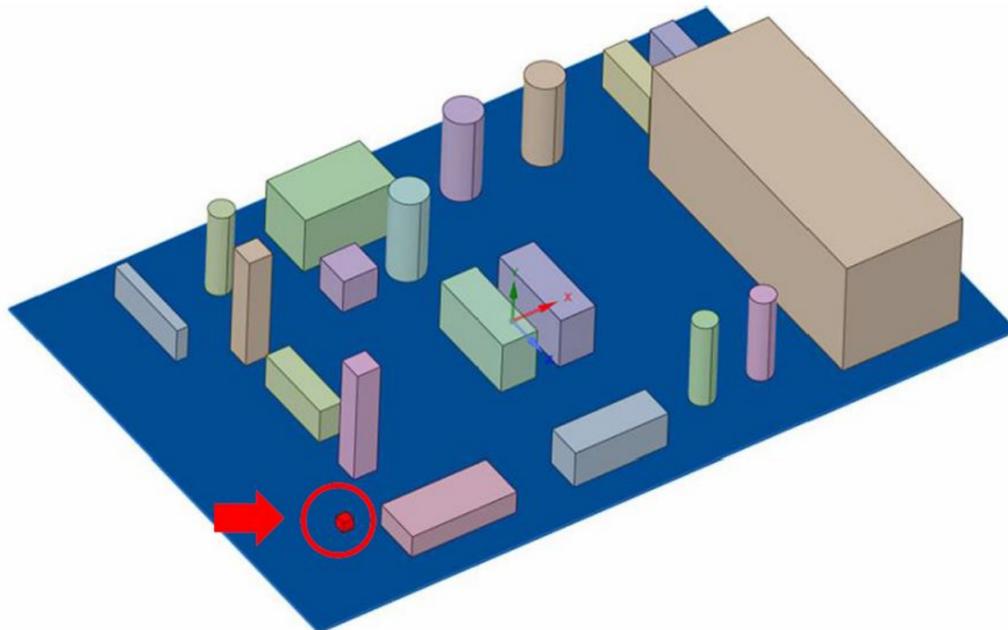


Figura 2.9 Posizione source box in piattaforma

A questo punto, una volta ottenuti i risultati della fase di rilascio, si può procedere con la fase di dispersione, dalla quale si otterrà la nube di gas come ad esempio in Figura 2.10.

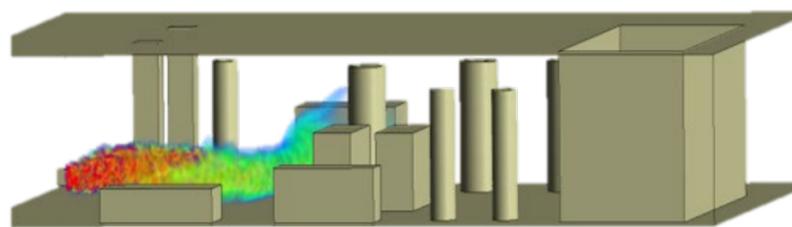


Figura 2.10 Nube di gas in piattaforma

L'idea della SB non nasce solo dalla necessità di modellizzare fenomeni fisici molto diversi tra loro separatamente; l'obiettivo è anche quello di realizzare una serie di simulazioni, in un numero di SB che sia rappresentativo della maggior parte dei casi possibili di rilascio accidentale, in un impianto di produzione di gas. Alla fine si otterrà una "libreria" di casi di SB diverse (caratterizzate da diversi parametri) dalla quale andare ad attingere i risultati utili allo step due (la dispersione) ogni qual volta vi sia la necessità di simulare un incidente di rilascio; questo porterebbe ad una notevole riduzione di tempo per il calcolo in quanto non si dovrebbe simulare nuovamente la fase di rilascio ma solo quella di dispersione.

2.2.2 Cenni sulla fluidodinamica computazionale (CFD)

Per l'analisi di eventuali incidenti di rilascio di sostanze gassose in ambiente offshore è stato dunque scelto uno "strumento" che riesca con una certa accuratezza a simulare il fenomeno fisico coinvolto. La fluidodinamica computazionale (CFD) è ad oggi molto usata in ambito ingegneristico laddove vi siano fenomeni che coinvolgano moti di fluidi di varia natura, e talvolta anche fenomeni chimici e termici. Gli ingredienti principali di questo strumento sono:

- Modello fisico: che descriva in maniera quanto più fedele il fenomeno fisico coinvolto;

- Metodo numerico: che permetta di trovare una soluzione numerica tramite processo iterativo ad un'equazione non risolvibile analiticamente.

Alcuni dei motivi per i quali si sceglie di adottare questo metodo per analizzare determinati scenari in alternativa ad una campagna sperimentale sono:

- Tempi ridotti di progetto e calcolo;
- Possibilità di considerare situazioni difficili da replicare nella realtà;
- Possibilità di valutare grandezze difficilmente misurabili;
- Costi economici ridotti.

Ovviamente, di contro, vi sono degli aspetti che rendono l'analisi CFD un po' problematica; innanzitutto bisogna sempre valutare quale sia il livello di "validità" di una determinata simulazione, ovvero bisogna capire quanto questa stia realmente dando dei risultati affidabili e "sensati". Bisogna poi fare i conti con i limiti della macchina sulla quale vengono effettuate le simulazioni in termini di processori e memoria RAM, che obbligano a trovare un compromesso tra "precisione" e "costo computazionale"; infatti, se per avere una soluzione più precisa è necessario che il dominio sia discretizzato in maniera molto fine, e che dunque ci siano molti nodi sui quali calcolarla, è anche vero che il numero di questi ultimi è limitato dalla "potenza" della macchina e alla crescita del numero di nodi è associata una crescita esponenziale del tempo di calcolo.

Come sappiamo il moto dei fluidi è descritto dalle "equazioni di Navier Stokes" (NS) sotto alcune ipotesi:

- Fluido continuo;
- Fluido chimicamente omogeneo e non reagente;
- Fluido privo di cariche elettriche.

Le suddette equazioni che sono differenziali alle derivate parziali, descrivono il moto a livello macroscopico e derivano da tre bilanci: massa, quantità di moto ed energia. Il problema principale di questo sistema di equazioni è legato al fatto che non presentano soluzione analitica a parte alcuni semplici casi come un moto laminare in geometrie semplici, ma la realtà dei fatti è ben diversa, infatti sono solitamente coinvolti fenomeni di turbolenza e geometrie complesse. In questo caso si parla di mancata "chiusura del problema" ovvero vi sono più incognite che equazioni. La soluzione analitica generale rappresenta una sfida per tutti i matematici del mondo infatti questo problema fa parte dei "7 problemi per il millennio".

La "fluidodinamica computazionale" ha invece come obiettivo quello di dare una soluzione approssimata del problema cercando di avere una accuratezza quanto più possibile elevata, sfruttando algoritmi e analisi numerica ed utilizzando un calcolatore. Si possono avere diversi approcci per trovare una soluzione [43]:

- Direct Numerical Simulation (DNS): è il metodo più accurato in quanto le equazioni vengono discretizzate direttamente senza alcun processo di "media" o approssimazione alcuna; in questo caso l'errore è dovuto unicamente alla discretizzazione numerica, quindi può essere controllato. Dal punto di vista concettuale è l'approccio più semplice, in questo caso tutti i moti del flusso sono risolti, ma dal punto di vista computazionale è quello più oneroso;
- LES (Large Eddy Simulation): questo approccio sfrutta il fatto che esistono diverse "scale" di lunghezza e tempo nei flussi turbolenti. In particolare i moti con scale più ampie sono più energetici per cui, secondo questo metodo, questi ultimi sono risolti in maniera "esatta" a scapito di quelli più "deboli" che quindi contribuiscono meno al trasporto di materia ed energia. "Large

Eddy” infatti significa “vortici grandi”, che in questo caso sono quelli che vengono risolti con maggiore accuratezza.

- RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes): questo approccio è sicuramente quello più interessante per chi vuole fare delle stime ingegneristiche su alcune quantità medie come ad esempio delle forze su un corpo, la quantità di sostanza rilasciata ecc...In questo approccio le quantità turbolente sono scomposte in due parti: una media su un determinato arco di tempo e una componente fluttuante. Si ottengono delle equazioni semplificate che permettono di avere una soluzione “a basso costo” computazionale che tuttavia permetta di stimare le grandezze di interesse.

Questo ultimo approccio è quello scelto in questo lavoro poiché rappresenta il giusto compromesso tra accuratezza richiesta e costo computazionale. Fanno parte di questa categoria diversi modelli [44]:

1. Modelli algebrici (Prandtl-von Karman...);
2. Modelli a una equazione (Spalart_Allmaras...);
3. Modelli a due equazioni (k- ϵ , k- ω ...);
4. Stress transport models.

I modelli più utilizzati sono quelli a due equazioni in quanto rappresentano il giusto compromesso tra precisione e costo. In essi vengono aggiunte due equazioni alle pre-esistenti equazioni di NS mediate, in modo da chiudere il problema. Le due equazioni di trasporto in più servono a calcolare due quantità di turbolenza che a seconda del modello sono:

- k: energia cinetica turbolenta;
- ϵ : rateo di dissipazione dell'energia turbolenta.

se si sceglie il modello k- ϵ .

- k: energia cinetica turbolenta;
- ω : velocità di dissipazione specifica;

se si sceglie il k- ω .

La scelta del modello è molto importante e dipende principalmente dalla fisica del problema, dall'accuratezza richiesta, dalla capacità computazionale e dal tempo a disposizione. I modelli a un'equazione sono indicati principalmente per flussi confinati in presenza di gradienti di pressione avversi [45]. I modelli a due equazioni sono storicamente i più usati in ambito CFD industriale, per questo l'interesse in questo lavoro ricade principalmente su di essi. In particolare il “k- ϵ ” è molto usato per la sua robustezza, economicità e accettabile accuratezza per un grande range di flussi turbolenti, ma ha lo svantaggio di risultare non sensibile a gradienti di pressione avversi e alla separazione del “boundary layer” [45] il che non lo rende adatto a modellizzare flussi esterni. Il “k- ω ” ha caratteristiche analoghe al precedente ma presenta alcuni vantaggi, ad esempio una migliore predizione di flussi in gradiente avverso e di separazione del boundary layer; il difetto sta nel fatto che la soluzione è molto sensibile ai valori di k e ω nella parte di flusso libero (lontano dallo strato limite); per ovviare a questo problema è stato sviluppato il modello “SST k- ω ” che ha caratteristiche ibride tra i due modelli precedenti ed è quello che viene raccomandato di usare in ANSYS Fluent, che sarà il software scelto per simulare i vari casi.

Il primo step per risolvere le equazioni di NS approssimate è quello di discretizzare le equazioni per trasformarle in equazioni algebriche che verranno risolte su ogni nodo della “mesh” (griglia di calcolo) scelta. A questo proposito esistono diversi metodi di discretizzazione:

1. **Differenze finite**: il dominio viene coperto da una griglia di punti e in corrispondenza di ognuno le derivate sono calcolate come rapporto incrementale che coinvolga i nodi adiacenti [43];

2. **Elementi finiti:** in questo caso il dominio viene discretizzato in maniera non strutturata creando una griglia di piccoli elementi di forma codificata (triangoli, quadrilateri ...) e su ciascuno di essi la soluzione viene calcolata come combinazione lineare di funzioni dette “shape functions” [43];
3. **Volumi finiti:** il punto di partenza in questo caso è la formulazione integrale delle equazioni di conservazione; il dominio viene diviso in questo caso in una serie di “volumi di controllo” (CVs) e le equazioni di conservazione vengono applicate ad ognuno di essi. I valori sulle superfici dei CVs sono espressi in funzione dei valori nodali tramite appositi metodi di interpolazione [43].

Il software adottato in questo caso è ANSYS Fluent 18.2 ed usa il metodo ai volumi finiti.

2.3 ANSYS Fluent

ANSYS Fluent è un software di simulazione CFD molto diffuso in ambito accademico ed industriale, dopo l’acquisizione di Fluent da parte di ANSYS Inc. il software fluidodinamico è stato integrato nell’ambiente ANSYS Workbench garantendo un interfacciamento molto buono con altri strumenti quali CAD e altri di analisi delle strutture [46].

Tra le sue caratteristiche principali che lo rendono adatto per i fini di questo studio troviamo:

- Modelli fisici avanzati di flussi comprimibili e incomprimibili;
- Modelli fisici avanzati di turbolenza;
- Calcolo parallelo;
- Accuratezza e robustezza.

Per quanto riguarda la generazione della mesh il software usa una tecnologia di mesh non strutturata; in 3D gli elementi possono essere esaedri, tetraedri, poliedri, prismi e piramidi, inoltre si possono usare combinazioni di vari tipi di mesh con buona accuratezza dei risultati, anche in casi di “non-matching” delle interfacce delle diverse mesh [47]. I “solvers” processano in maniera robusta ed efficiente qualsiasi modello fisico e tipo di flusso, sia stazionario che transitorio, incomprimibile o comprimibile. Una caratteristica fondamentale che permette di ridurre i tempi di calcolo è legata alla possibilità di sfruttare più processori in parallelo.

I modelli a disposizione per modellizzare la turbolenza sono diversi, tra i quali sono presenti quelli di maggiore interesse ovvero quelli a due equazioni (k - ϵ , k - ω ,...) e loro varianti. Un altro aspetto importante è la possibilità di utilizzare miscele di fluidi, funzione che sarà utilizzata in questo studio. L’ultima ma non meno importante caratteristica è legata alle funzionalità di post processing integrate, che permettono di visualizzare tutte le grandezze di interesse con rendering 3D, immagini 2D di sezioni del dominio e di calcolare valori di velocità, frazioni in massa (e molte altre quantità fisiche) in maniera molto flessibile.

2.4 “Coupling” e studio di sensibilità

L’obiettivo principe che ci si è posti è stato quello di cercare un modo di “accoppiare” le simulazioni della fase di rilascio, sfruttando i risultati di uno dei lavori di tesi precedenti [11], a quelle della fase di dispersione. D’ora in poi ci si riferirà a questo “accoppiamento” con il termine “coupling”. In pratica si è trattato di estrapolare dei risultati (profili di velocità, profili di frazione in massa di CH_4) dalle facce di output della SB (dominio di calcolo della fase di rilascio) da dare in input alla simulazione di dispersione nella quale la SB è intesa come “black box”. La necessità di dare in input a quest’ultima esattamente i profili di velocità e frazione in massa di CH_4 , invece che dei valori medi, nasce dall’esigenza di simulare una situazione quanto più realistica e conservativa possibile; infatti, come vedremo nello studio che segue, lavorare con valori medi o profili approssimati potrebbe portare a sottostime pericolose della quantità di sostanza rilasciata e dell’area della piattaforma interessata dalla nube di infiammabile.

2.4.1 Metodo generale per il “coupling”

Nell’affrontare il problema del coupling sono state incontrate diverse criticità. La prima riguarda il fatto che il dominio delle simulazioni della fase di rilascio (SB) è stato ridotto ad un quarto per ragioni di simmetria e dunque i profili estrapolati dalle facce riguardano solo porzioni ridotte dell’intera interfaccia SB/piattaforma; ciò rappresenta un problema poiché l’interfaccia SB/piattaforma coinvolge tutta la superficie esterna della SB, a netto delle simmetrie, dunque dopo aver estrapolato i profili “parziali” il primo passo che si è fatto è stato quello di processare questi dati per ottenere dei profili “ricostruiti”. Il secondo problema da affrontare è stato quello di gestire la traslazione tra il sistema di riferimento della simulazione dello step 1 e quella dello step 2, in modo da caricare i profili nella maniera corretta. Tutti queste criticità sono state risolte, e di seguito possiamo vedere come.

La Figura 2.11 illustra appunto il dominio di calcolo (source box) ridotto ad un quarto.

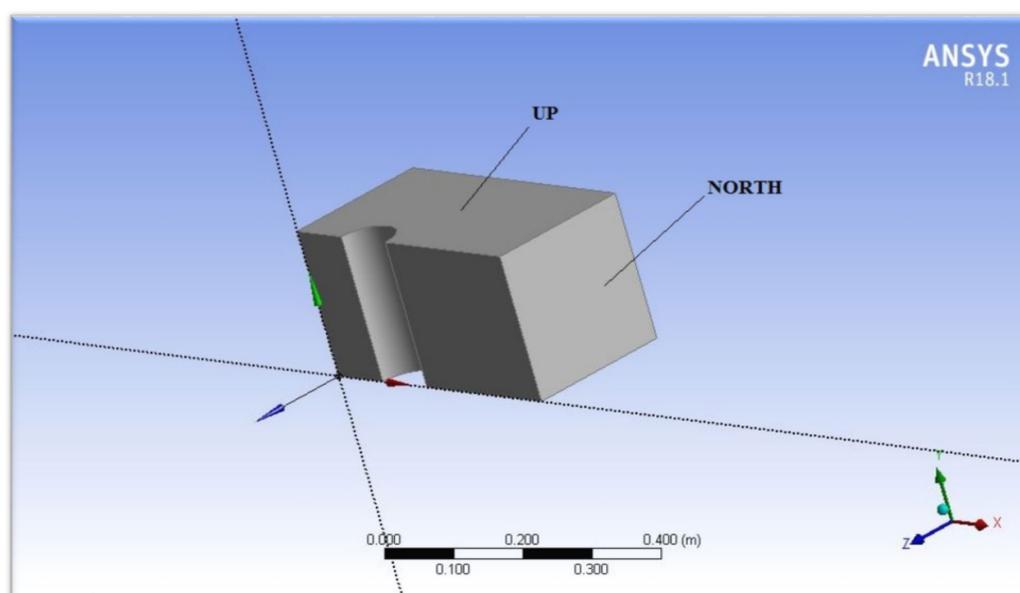


Figura 2.11 Modello CAD 3D di un quarto della source box

Il punto di rilascio è collocato nell’origine degli assi, dunque le facce giacenti sui piani XZ e XY sono di simmetria, il cilindro è una parete mentre tutte le altre facce sono di “output”; solo le facce chiamate “up” e “north” (cui d’ora in poi si farà riferimento sempre con questi termini) sono considerate per

estrapolare i risultati, poiché la quantità di sostanza che esce dalle altre è nettamente trascurabile, essendo di quattro/cinque ordini di grandezza inferiore. I piani YX e ZX sono di simmetria, per cui sul lato superiore (up) sarà estrapolato solo metà dell'intero profilo, mentre sul lato frontale (north) solo un quarto; dunque, prima di procedere con l'impostazione della simulazione di dispersione, è stato necessario processare i files di uscita contenenti i profili di velocità e frazione in massa di CH₄ per ricostruire i profili interi; la necessità di avere dei profili interi è dovuta al fatto che l'interfaccia SB/piattaforma interessa tutta quanta la superficie della SB e non è riducibile per mezzo di simmetrie.

Per effettuare la ricostruzione dei profili, i files estrapolati da ANSYS Fluent contenenti le informazioni sulle facce up e north sono stati processati con diversi script Matlab (Appendici C-H) a seconda della faccia e della grandezza in questione (velocità o frazione in massa di CH₄). I risultati di questo processo sono diversi files con estensione adeguata per essere usati come condizioni al contorno in Fluent, ovvero “.PROF”; in particolare alla fine si ha a che fare con:

1. Profilo di velocità (solo in modulo) per la faccia north ricostruita (quadruplicata);
2. Profilo di frazione in massa di CH₄ per la faccia north ricostruita (quadruplicata);
3. Profili di velocità (componenti x, y, z) per la faccia up ricostruita (raddoppiata);
4. Profili di frazione in massa di CH₄ per la faccia up ricostruita (raddoppiata).

Il metodo per estrapolare i profili nel modo corretto è riportato nel dettaglio in APPENDICE A. I profili estrapolati appaiono come in Figura 2.12, Figura 2.13, Figura 2.14, Figura 2.15, Figura 2.16 e Figura 2.17. In particolare per le diverse facce considerate:

- north

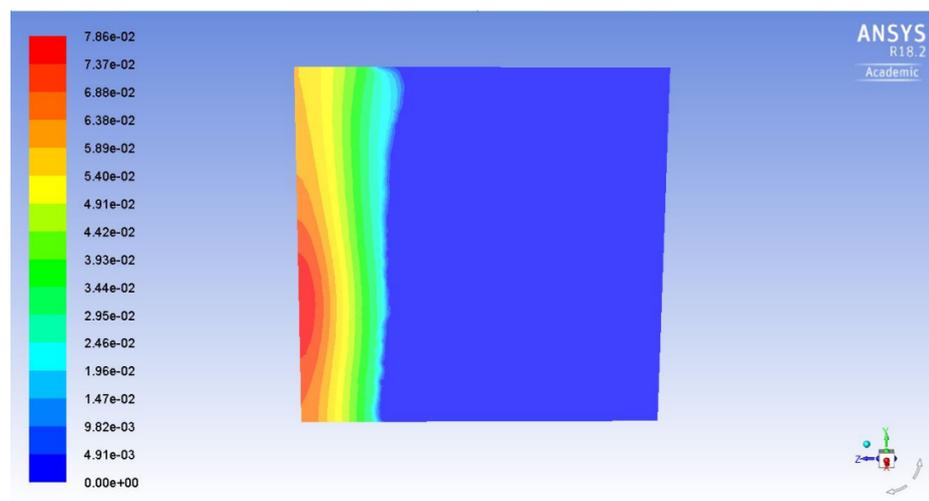


Figura 2.12 Profilo di frazione in massa di CH₄ estrapolato dalla faccia north

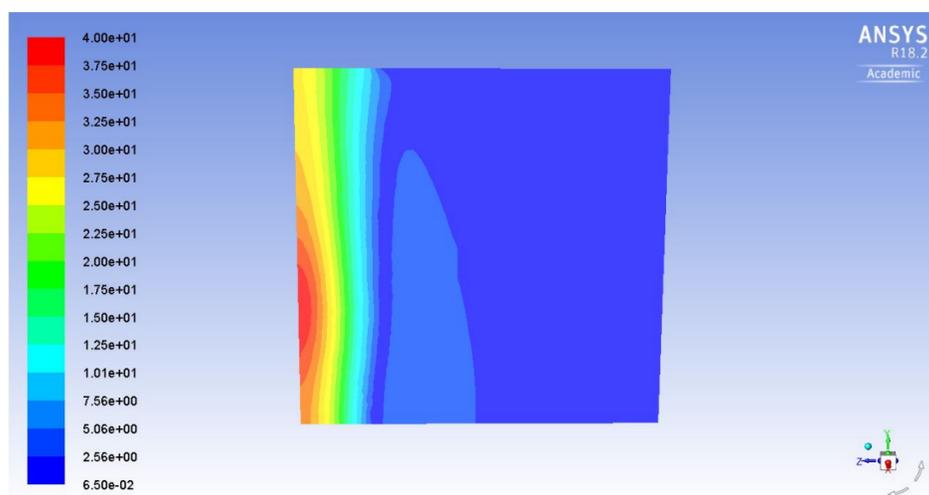


Figura 2.13 Profilo modulo di velocità estrapolato dalla faccia north

- up

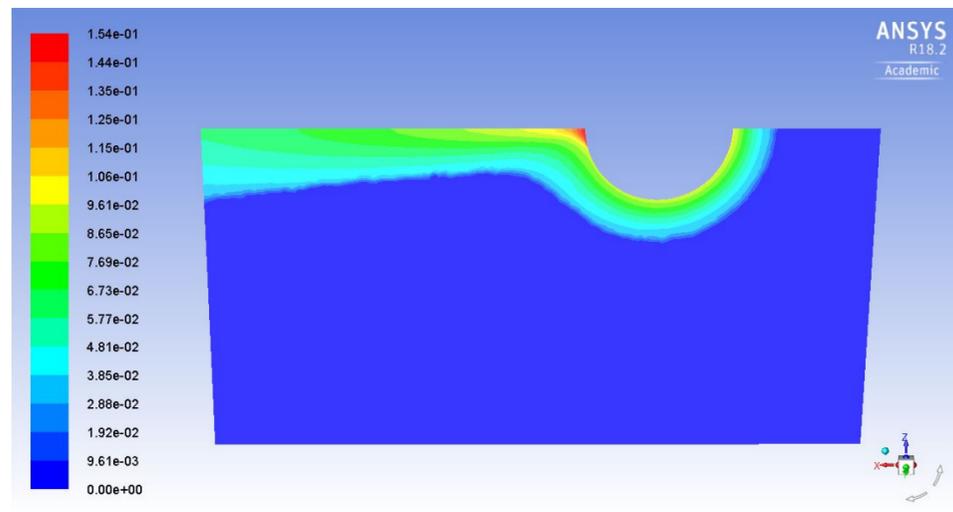


Figura 2.14 Profilo di frazione in massa di CH4 estrapolato dalla faccia up

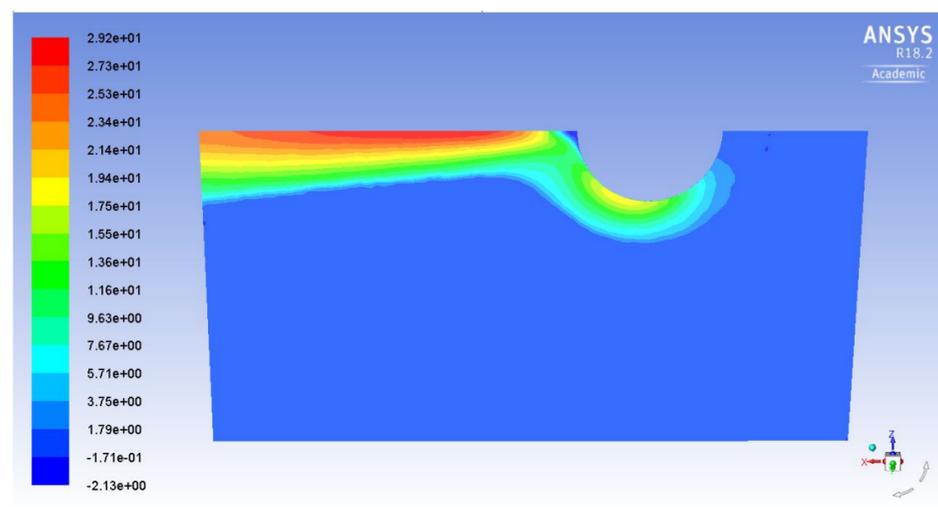


Figura 2.15 Profilo della componente x della velocità estrapolato dalla faccia up

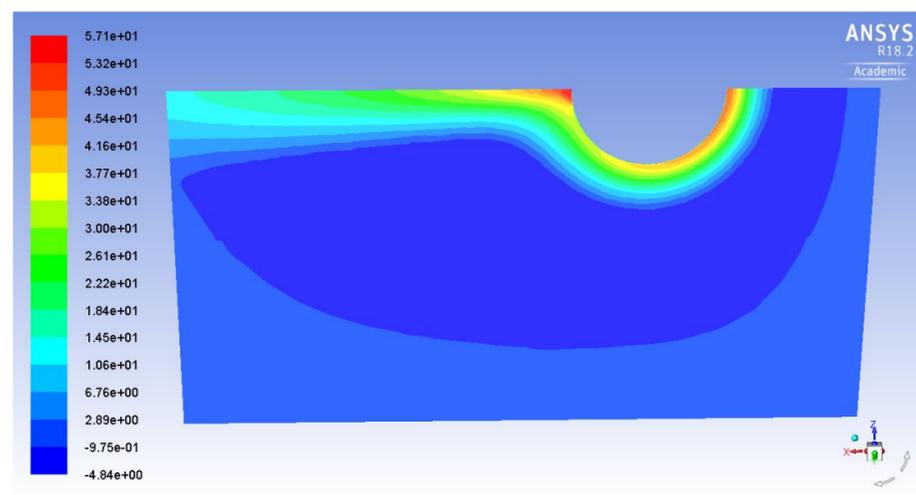


Figura 2.16 Profilo della componente y della velocità estrapolato dalla faccia up

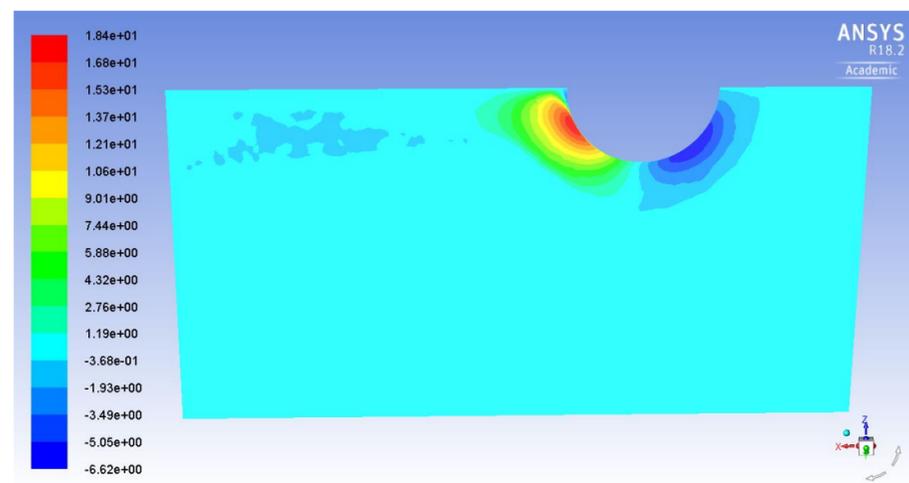


Figura 2.17 Profilo della componente z della velocità estrapolato dalla faccia up

Come si può notare sulla faccia north (Figura 2.12, Figura 2.13) appare solo un quarto del profilo totale mentre sull'altra solo metà (Figura 2.14, Figura 2.15, Figura 2.16, Figura 2.17). Come anticipato per ottenere dei profili "ricostruiti", ovvero che vadano a considerare le facce intere a netto delle simmetrie, ci si è serviti di vari script Matlab; il procedimento dettagliato per effettuare la ricostruzione è descritto in APPENDICE B.

Infine i profili ricostruiti sulle facce intere senza più simmetrie, appaiono come in Figura 2.18, Figura 2.19, Figura 2.20, Figura 2.21, Figura 2.22.

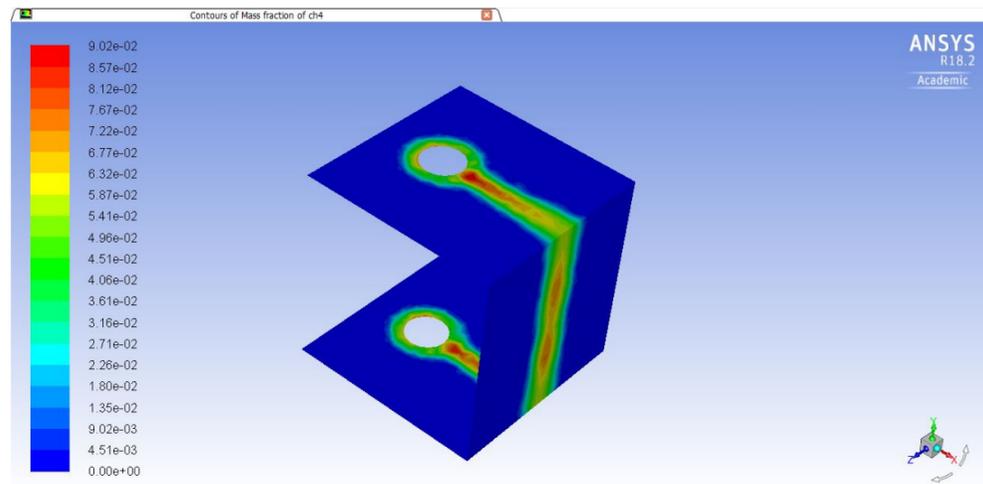


Figura 2.18 Profilo di frazione in massa di CH4 ricostruito su tutte le facce di interesse

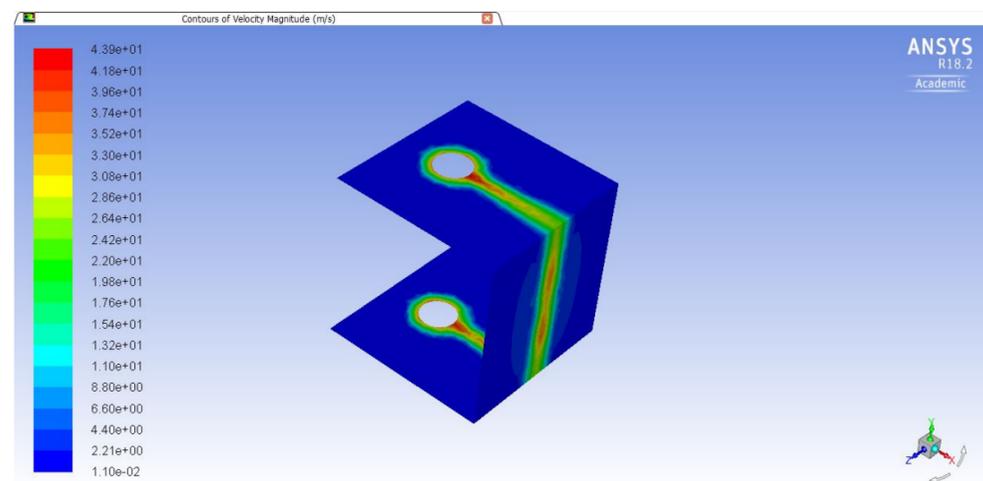


Figura 2.19 Profilo del modulo della velocità ricostruito su tutte le facce di interesse

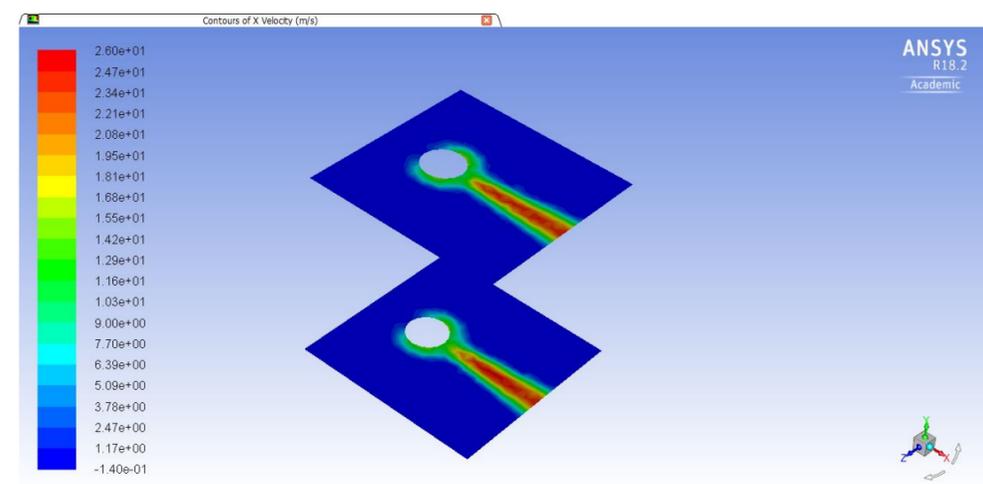


Figura 2.20 Profilo della componente x della velocità ricostruito sulle facce up e down

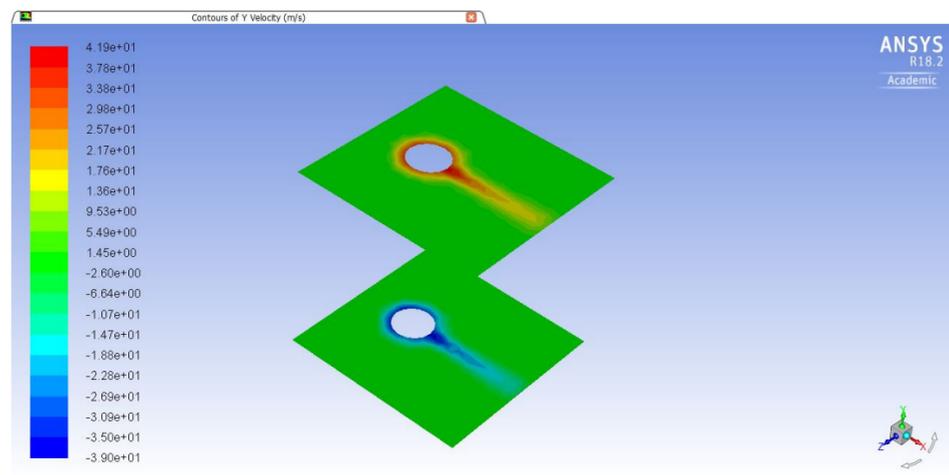


Figura 2.21 Profilo della componente y della velocità ricostruito sulle facce up e down

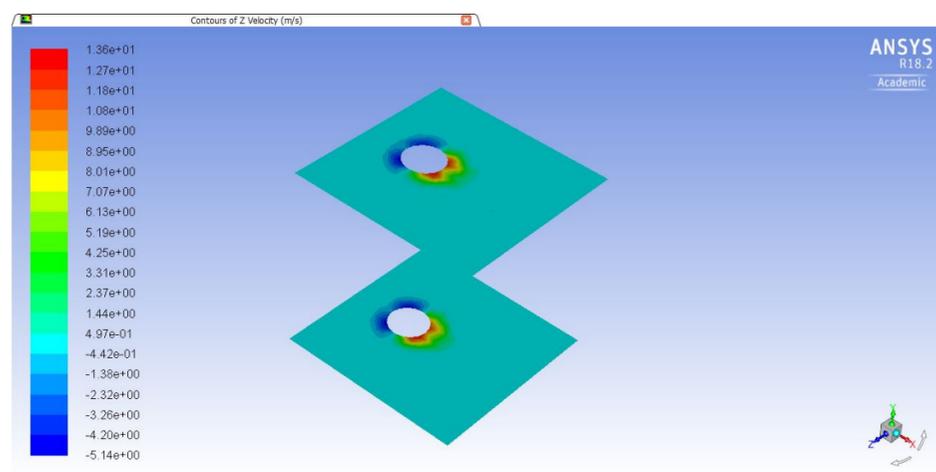


Figura 2.22 Profilo della componente z della velocità ricostruito sulle facce up e down

Come si può notare oltre alle facce up e noth ricostruite ne compare un'altra sottostante; essa non è altro che la faccia inferiore della SB corrispondente a quella superiore, per cui le condizioni da imporre saranno del tutto uguali fatta eccezione per la componente y della velocità che sarà negativa anziché positiva per ragioni di simmetria; guardando l'elenco di file precedente, compare anche "yveldown". D'ora in poi ci riferiremo a questa faccia chiamandola "down".

Un'altra questione critica è stata quella di dover gestire un sistema di coordinate diverso tra la simulazione di rilascio, in cui l'origine degli assi è posta nel punto di rilascio, e la simulazione di dispersione in cui l'origine degli assi è posta al centro della piattaforma. Per ovviare a ciò si è sfruttato un tool di Fluent che permette di traslare i profili da caricare come condizioni al contorno. Una volta entrati nel menù di Fluent di una specifica faccia su cui impostare una condizione al contorno è sufficiente cliccare su "Profiles" e successivamente "Read..." per caricare un determinato profilo (i file .PROF vanno messi nello stesso folder della simulazione) e con il comando "Orient..." si potrà traslare il profilo della quantità che si vuole; in questo caso la traslazione da effettuare è quella tra le origini degli assi dei diversi sistemi di riferimento. Ad esempio, nel caso specifico di quest'analisi il centro della SB si trova nelle coordinate (-12,1.5,7) nella piattaforma come si può vedere in Figura 2.23.

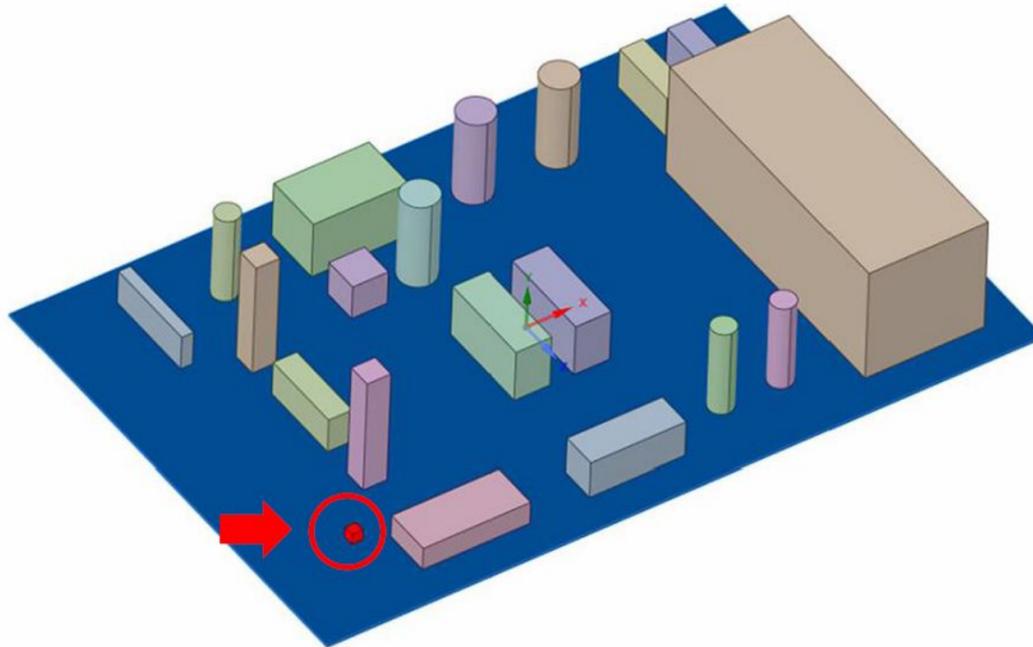


Figura 2.23 Posizione della source box in piattaforma

Considerando che nella simulazione di rilascio l'origine è posta all'inizio della source box (nel punto di rilascio), la traslazione dei profili sarà di (-12.23,1.5,7) m , infatti bisogna togliere un'ulteriore lunghezza pari a metà della lunghezza totale della source box alla coordinata x.

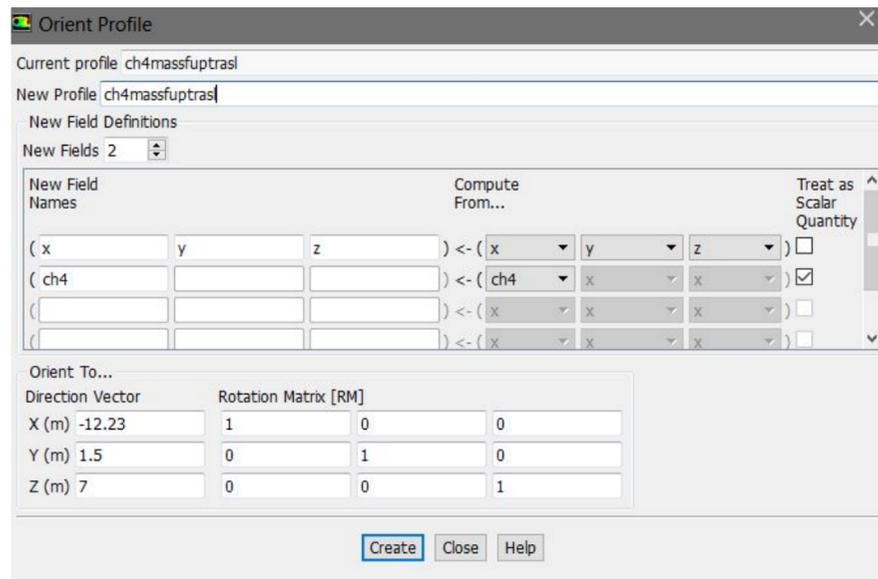


Figura 2.24 Menù "Orient Profile" di Fluent

In "New Profile" bisogna inserire il nome del nuovo profilo traslato, che generalmente può essere identico a quello di partenza con l'aggiunta del suffisso "trasl"; a destra sotto "Compute From..." si devono selezionare le coordinate sul primo rigo e la grandezza in questione (a seconda del profilo sarà "ch4", "velocity-magnitude", "x-velocity", "y-velocity" o "z-velocity") nella prima casella della seconda riga dopo aver spuntato "Treat as Scalar Quantity" a destra. In "New Field Names" si devono compilare i campi come in Figura 2.24, ovvero riproducendo esattamente quello che si ha a destra. Infine si devono compilare i campi sotto "Direction Vector" con i valori di traslazione prima citati. In "Profiles..." ora compariranno tutti i profili traslati pronti per essere caricati sulle facce apposite e negli specifici campi (velocità, specie per il CH₄).

Alla base della scelta delle grandezze da estrapolare (velocità e frazione in massa di CH₄) vi sono delle ragioni ingegneristiche, infatti ai fini di un'analisi di rischio in un ambito che coinvolga la diffusione di un inquinante il profilo di velocità e frazione in massa di CH₄ risultano essere i parametri più utili.

In particolare sulla faccia north si è deciso di estrapolare solo la distribuzione del modulo della velocità e non le varie componenti (u,v,w) in quanto la direzione della velocità è prevalentemente normale alla superficie d'uscita dunque sono state trascurate le direzioni “trasversali” a questa faccia. Sulla faccia up invece sono state estrapolate tutte le componenti in quanto la direzionalità della velocità è “obliqua” per cui tutte e tre giocano un ruolo fondamentale; la componente x è sicuramente dominante in quanto parallela all'asse del getto, ma l'impatto con l'ostacolo dentro la SB fa sì che anche le altre due diventino rilevanti. Come si può notare dalla Figura 2.21 la componente y ha un picco subito a contatto con l'ostacolo, infatti si può intuire che il getto si “impenna” subito dopo l'impatto con il cilindro generando una forte componente verticale della velocità. Dall'osservazione della Figura 2.22 possiamo invece vedere che la componente z ha dei valori negativi prima dell'ostacolo e positivi dopo, questo si può spiegare considerando che intorno al cilindro si generano dei “vortici secondari” [48] dovuti alla turbolenza del fenomeno e alla formazione di una vena fluida [49] subito dopo l'ostacolo che provoca il distacco del flusso a monte del cilindro.

Dunque ricapitolando, per le ragioni appena espresse sono stati considerati i seguenti profili per ciascuna faccia:

- north: profilo della frazione massica di CH₄ e modulo della velocità;
- up: profilo della frazione massica di CH₄ e componenti della velocità.

2.4.2 Analisi di sensitività

A questo punto si è pensato di condurre uno studio di sensitività della soluzione rispetto alla precisione con cui sono dati alla simulazione di dispersione i valori di input, derivanti dalla SB, con l'obiettivo di capire quale sia l'impatto su parametri d'interesse quali: volume totale di sostanza rilasciata, aree lambite dalla nube d'infiammabile e volume infiammabile.

L'idea è quella di realizzare due sets di simulazioni da confrontare con la simulazione più accurata di tutte ovvero il “coupling”; nel primo, che chiameremo SET 1, sull'interfaccia piattaforma/SB viene impostato un valore medio di frazione massica di, senza tener presente della sua reale distribuzione e si fa variare la velocità in questo modo:

SET 1

- Simulazione 1: velocità uniforme sulle facce (valor medio sulle facce);
- Simulazione 2: profilo di velocità discretizzato in maniera grossolana;
- Simulazione 3: profilo dettagliato di velocità.

nel secondo, che chiameremo SET 2, la situazione è esattamente speculare; sull'interfaccia piattaforma/SB viene mantenuto un valor medio costante di velocità senza tener presente la sua reale distribuzione e si fa variare il valore di frazione in massa di CH₄ in questo modo:

SET 2

- Simulazione 4: frazione in massa di CH₄ costante uguale al valor medio sulle facce (è la stessa simulazione 1 di prima, ma per comodità di rappresentazione dei risultati verrà rinominata simulazione 4 quando ci si riferirà al SET 2);
- Simulazione 5: profilo di frazione in massa di CH₄ discretizzato in maniera grossolana;
- Simulazione 6:profilo dettagliato della frazione massica di CH₄.

L'ultimo step sarà quello di effettuare una simulazione, che sarà chiamata “**coupling**”, con profili dettagliati di velocità e CH₄ contemporaneamente per fare un confronto con il resto delle simulazioni e capire quanto valga la pena di effettuare il “coupling” al posto di scegliere di impostare dei valori medi sulle facce risparmiando tempo e risorse.

2.4.3 Caratteristiche generali delle simulazioni

Per effettuare tutte le simulazioni dei SET 1 e 2 sono state fatte delle scelte riguardo a caratteristiche della source box, della piattaforma e delle condizioni al contorno che sono in comune, per cui il primo passo sarà quello di elencare e descrivere tutte le scelte preliminari che sono state fatte.

SOURCE BOX

La SB scelta per questi set di simulazioni ha le seguenti caratteristiche:

- Dimensioni: 46 cm × 46 cm × 46 cm;
- Posizione del foro: al centro di una faccia;
- Dimensioni foro: 1 cm;
- pressione di rilascio: 10 bar;
- Sostanza rilasciata: metano;
- Ostacolo: cilindrico di diametro 10 cm posto in linea con l'asse del getto;
- Distanza ostacolo: 10 cm.

Essa rappresenta il caso in cui si abbia una rottura su una di due tubazioni che corrono in parallelo. Tale situazione è molto frequente in un tipo di impianto industriale di produzione dell'energia, e dunque nello specifico in una piattaforma off-shore; tutti i parametri sono selezionati in base ad un'analisi statistica che definisca quali siano le condizioni che si verificano più di frequente.

Il foro in questione è modellizzato con un ugello convergente, il quale è necessario per simulare un getto sottoespanso e dunque gli effetti di comprimibilità annessi [11]; per quanto riguarda le dimensioni del foro e posizione, dimensione e forma dell'ostacolo sono state scelte per dare continuità al lavoro precedentemente svolto [11] e dunque potersi avvalere di un caso già approfonditamente studiato e di simulazioni affidabili da cui estrapolare dei dati. In Figura 2.25 e Figura 2.26 possiamo vedere il CAD 3D della source box.

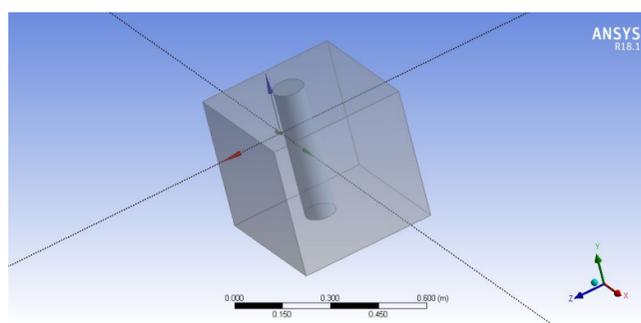


Figura 2.25 Modello CAD 3D della source box

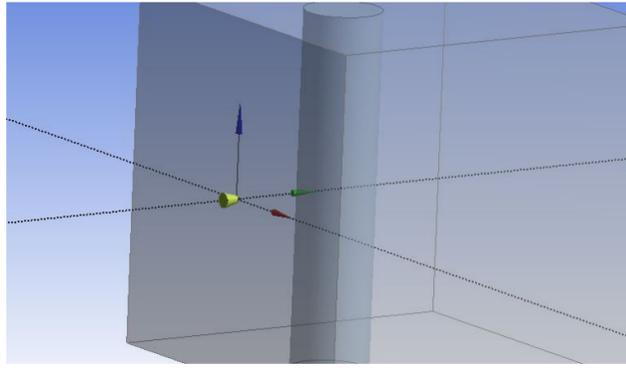


Figura 2.26 Modello CAD 3D della source box, dettaglio dell'ugello

PIATTAFORMA

La piattaforma che si è scelto di analizzare è localizzata nelle acque poco profonde del Mar Adriatico a largo delle stazioni meteorologiche poste a Ravenna Punta Marina e Ancona Boa; la scelta della posizione è fondamentale per determinare le condizioni meteorologiche cui sarà sottoposta. Analizzando le distribuzioni del vento a Ravenna (Figura 2.27) e Ancona Boa (Figura 2.28) e facendo riferimento ai dati raccolti dalle stazioni meteorologiche, possiamo dunque stimare la condizione media più frequente:

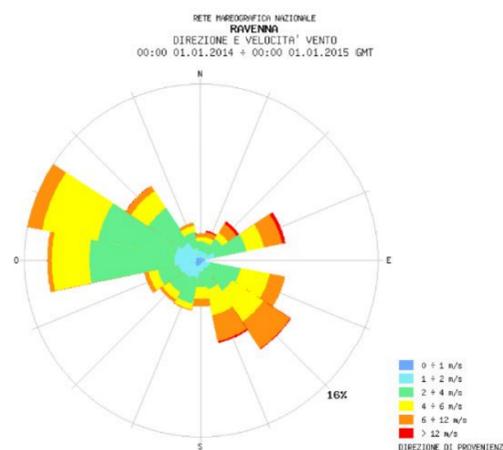


Figura 2.27 Distribuzione della direzione del vento, Ravenna [50]

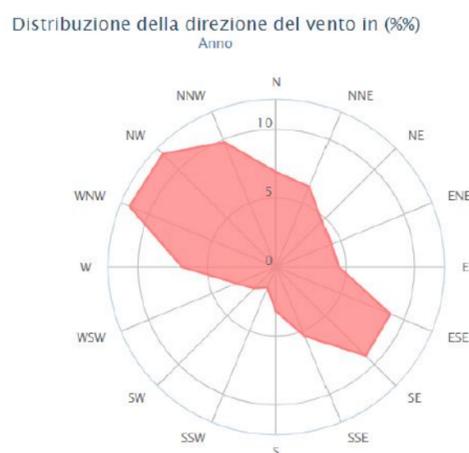


Figura 2.28 Distribuzione direzione del vento, Ancona Boa [51]

Dall'analisi di questi dati si è stimato che la direzione più frequente è Nord-Ovest e la velocità 6 m/s; per le simulazioni si è optato dunque per tale valore della velocità del vento con inclinazione di 45° in direzione Nord-Ovest appunto. In Figura 2.29 si può vedere come la piattaforma è orientata nello spazio.

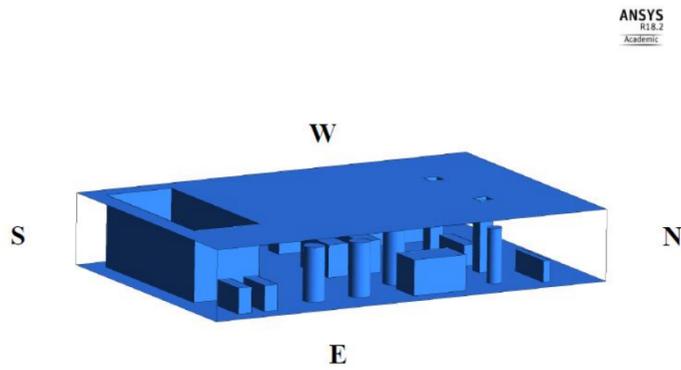


Figura 2.29 Piattaforma nello spazio

La scelta del tipo di piattaforma è stata fatta basandosi sul fatto che la maggior parte delle strutture in Italia sono emerse, per cui in questo caso si ha una piattaforma di produzione con struttura emersa di tre decks, di cui quello centrale è di produzione ed è quello che è stato considerato in fase di analisi (Figura 2.29). Un'altra caratteristica importante è il tipo di pavimentazione, che in questo caso è stato considerato di tipo *plated*, dunque la parete inferiore e superiore sono modellizzate come muri impenetrabili dal gas, influenzando notevolmente il fenomeno di dispersione. La scelta del tipo di pavimentazione è dovuta al fatto che in Italia sono molto più frequenti gli impianti di estrazione di Gas Naturale nei quali, dal punto di vista della sicurezza, è più conveniente avere una separazione dei decks in modo tale da evitare che il gas si disperda anche in altri piani, per cui la pavimentazione di tipo *plated* è soluzione più comune e diffusa.

Il piano di produzione è stato rappresentato in maniera semplificata tramite una ricostruzione CAD che possiamo vedere in Figura 2.30.

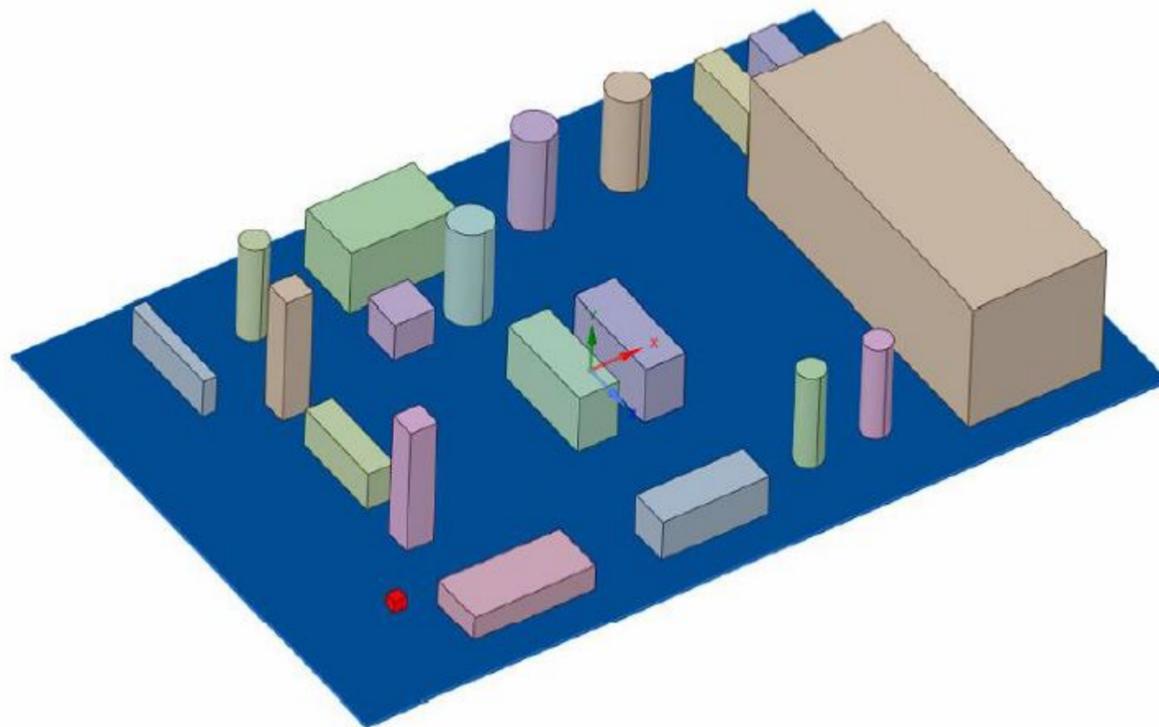


Figura 2.30 Modello CAD 3D della piattaforma [12]

Come possiamo notare sono presenti numerosi solidi all'interno, cilindri e parallelepipedi; essi sono i modelli 3D semplificati dei vari componenti presenti in un deck di produzione, atti al trattamento e la separazione di olio, gas e acqua, e alla sicurezza. In Figura 2.31 possiamo vedere una lista dei principali componenti con le corrispettive dimensioni.

	Componente	Dimensioni [m]	Altezza [m]
A	ELECTRICAL ROOM	5x12.5	5
B	HP COMPRESSOR SUCTION SCRUBBERS	$\phi=1$	3.8
C	HP COMPRESSOR DISCHARGE SCRUBBERS	$\phi=1$	3.8
D	OIL TREATER	4x1.5	1.6
E	LACT UNIT	4.5x2	2.5
F	PILLAR	1x1	5
G	DRY OIL TANK	1x3.5	1.5
H	PILLAR	1x1	5
I	PIG TRAPS	0.5x4	1.5
L	GAS FILTER SEPARATOR	$\phi=1$	3.8
M	GLYCOL REGENERATOR	4x2.5	2.5
N	GLYCOL FILL PUMP	1.5x1.5	1.5
O	GLYCOL TANK	$\phi=1.5$	3.8
P	DIESEL FUEL STORAGE TANK	$\phi=1.5$	3.8
Q	DIESEL FUEL STORAGE TANK	$\phi=1.5$	3.8
R	POWER GENERATOR	1x3	2.8
S	POWER GENERATOR	1x2	2.8
T	SEPARATOR	1.5x4	2.3
U	SEPARATOR	1.5x4	2.3

Figura 2.31 Tabella componenti piattaforma [12]

Le dimensioni del deck sono basate su una piattaforma reale a struttura fissa così come è realistica la scelta del posizionamento dei componenti in esso. Di seguito una lista riassuntiva delle caratteristiche dimensionali principali:

- Lunghezza: 30 m;
- larghezza: 20 m;
- Spessore deck: 0.1 m;
- Distanza interdeck: 5 m;
- Lato piloni: 1 m.

Il dominio sul quale sono stati svolti i calcoli su Fluent (Figura 2.32) è stato ottenuto generando un unico solido con dimensioni del deck al quale sono stati sottratti i vari ostacoli con un'operazione booleana nel "Design Modeler" di Fluent [12].

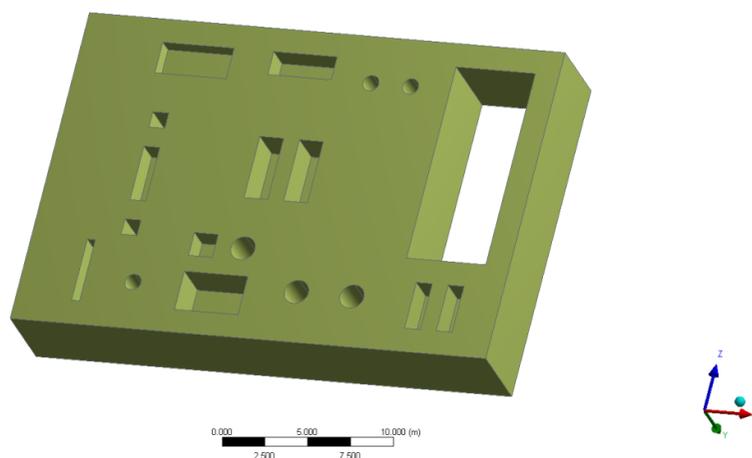


Figura 2.32 Modello CAD 3D della piattaforma dopo la sottrazione degli ostacoli

Gli ostacoli non sono altro che i componenti di cui sopra e sono definiti tali perché dal punto di vista del rilascio di fluido rappresentano un ostacolo al moto dello stesso, per cui come vedremo sulle loro pareti sarà impostata una condizione al contorno ad hoc, ovvero “*wall*”.

La posizione della SB è visibile in Figura 2.23, le coordinate del suo centro all’interno della piattaforma sono -12, 1.5, 7 m, dunque si trova vicino all’angolo Nord-Ovest della piattaforma; la scelta della posizione è dovuta al fatto che si è scelto di analizzare la situazione più critica, infatti in questo modo data la direzionalità del vento, la nube investirà tutta la piattaforma. Qui possiamo vedere un dettaglio del CAD della SB:

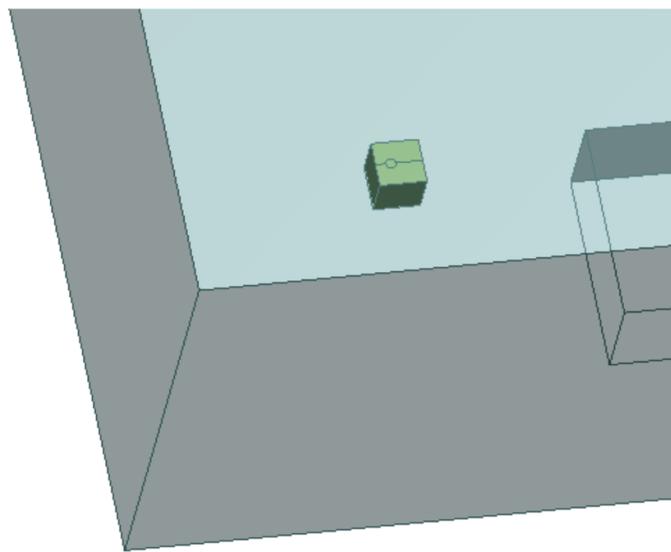


Figura 2.33 Modello CAD 3D, dettaglio source box in piattaforma

MESH

La mesh è stata mantenuta identica a quella usata in [12], sulla quale è stata effettuato uno studio di *grid independence* per scegliere la mesh con un numero di elementi ottimizzato. Di seguito ne sono riportate le caratteristiche principali e le proprietà di qualità più importanti come “*skewness*” e “*orthogonal quality*” i cui significati saranno spiegati meglio successivamente in questo paragrafo.

La prima cosa da fare per effettuare una simulazione in cui vi sono due corpi a contatto è di definire delle apposite “*contact regions*” tra le facce di output della source box e le corrispondenti facce di input della piattaforma in modo tale da far capire al software il “verso” della dispersione, ovvero per far sì che il gas disperda all’interno della piattaforma e non all’interno del volume della source box.

Il metodo di discretizzazione adottato nel menù “*Automatic Method*” di Fluent è “*Tetrahedrons*” per tutti e due i solidi (source box e piattaforma). Nel menù generale della mesh è stato selezionato “*Adaptive*” in “*Size Function*” e, per avere una maggiore raffinatezza, è stato selezionato “*Fine*” in “*Relevance Center*”; in “*Element Size*” è stato impostato una dimensione di riferimento di 0.2 m e in “*Defeature size*” 2,657e-3 m [12].

È stato inoltre inserito un “*Inflation layer*”, visibile in Figura 2.34, su tutte le facce degli ostacoli presenti in modo da avere una maggiore accuratezza nel risolvere lo strato limite che si genera una volta che il fluido entra in contatto con la parete. È stato scelto un metodo di tipo “*First layer thickness*” in cui il primo strato è stato imposto di 0.001 m; il numero totale di strati è stato settato a 20 e il “*Growth rate*” a 1.2 [12].

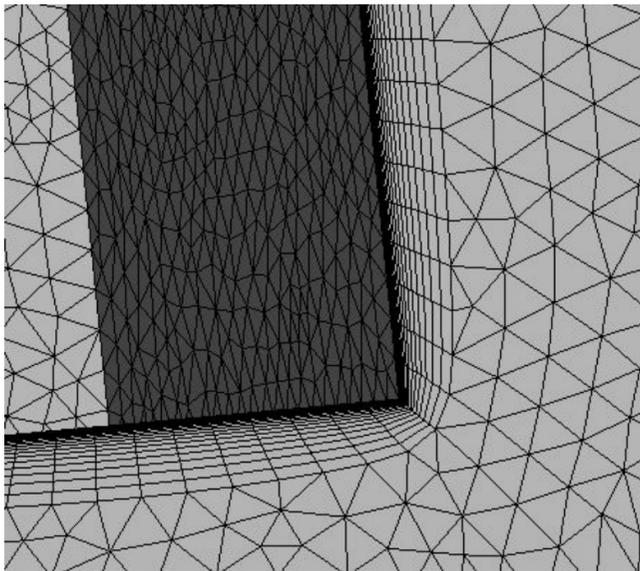


Figura 2.34 Dettaglio della mesh: inflation layers sugli ostacoli

Infine sono stati impostati due “Face Sizing”, il primo su tutte le facce degli ostacoli con una dimensione dell’elemento di 0.1 m e il secondo sulle facce della piattaforma corrispondenti a quelle della source box con una dimensione dell’elemento di 0.02 m. Il secondo “Face Sizing” è l’unica differenza che intercorre tra questa mesh è quella utilizzata in [12], e il suo inserimento è dovuto al fatto che in questo caso si è cercato di aver una maggiore rifinitura sulle facce su cui impostare le condizioni di “velocity inlet” con i profili estrapolati dalla simulazione della fase di rilascio. In Figura 2.35 si può osservare una sezione della mesh in cui compare questa rifinitura.

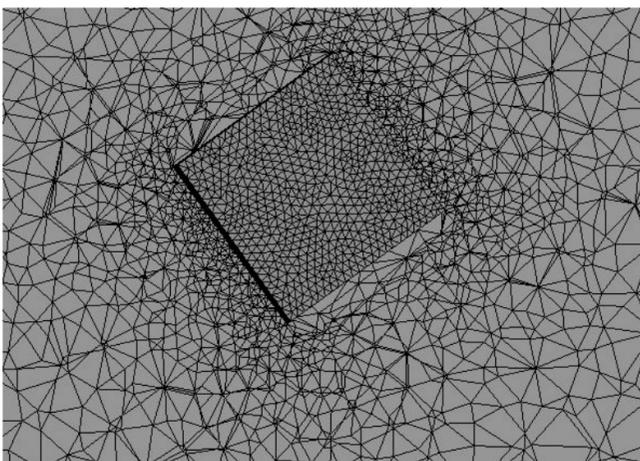


Figura 2.35 Dettaglio della mesh: Face sizing 2

La mesh complessiva appare come illustrato in Figura 2.36.

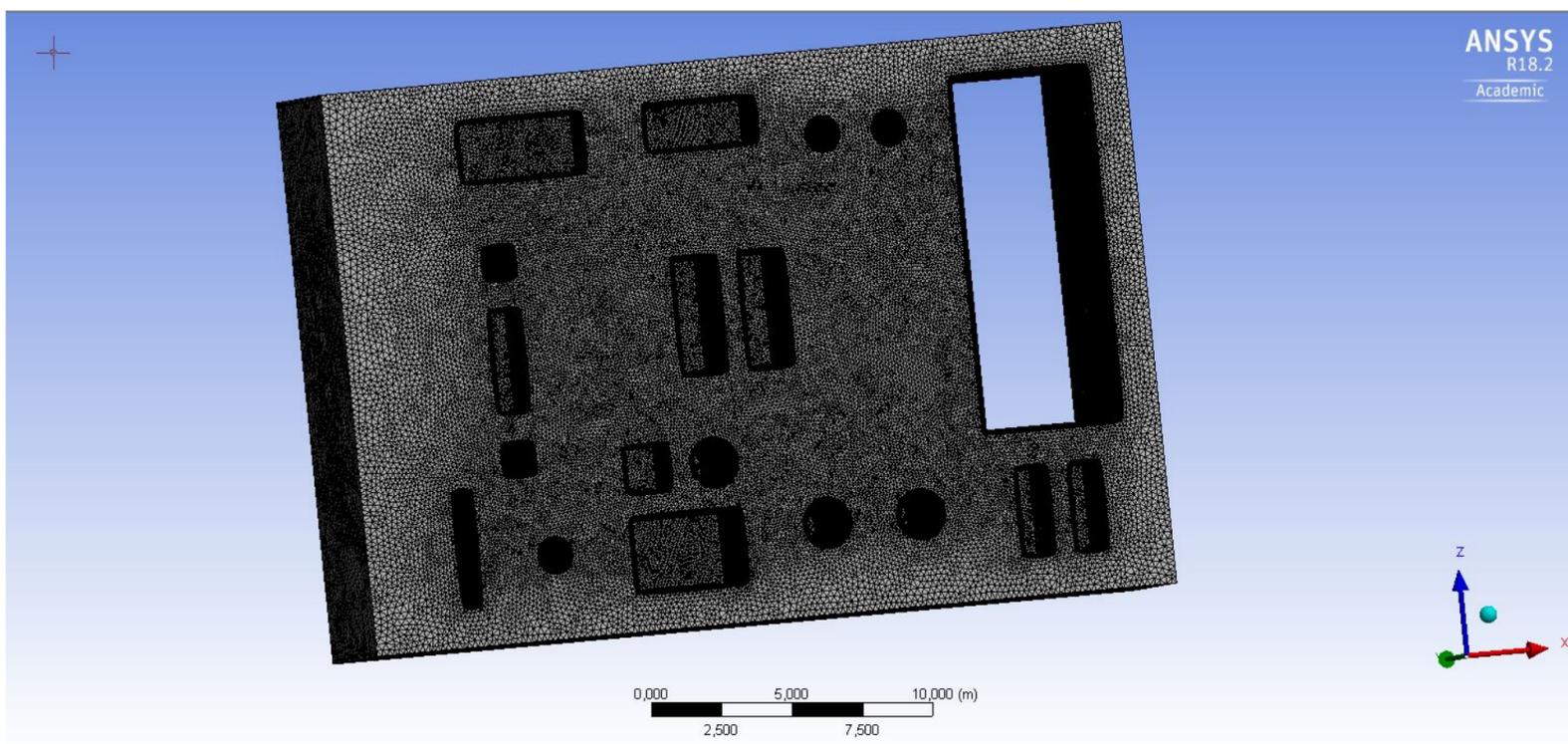


Figura 2.36 Mesh totale piattaforma

Il numero di elementi totali è: 4566115. Per quanto riguarda la qualità della stessa sono stati osservati i valori di:

Skewness – riguarda la forma della cella. Paragona la forma di una cella con quella di una equilatera di volume equivalente. Valori troppo elevati sono dannosi in termini di accuratezza e stabilità della soluzione. La scala di valori va da 0 che corrisponde ad una cella equilatera a 1 che equivale ad una cella degenera. Il valor medio ottenuto è circa 0.23; nel grafico in Figura 2.37 possiamo vedere il numero di elementi per diversi valori di skewness.

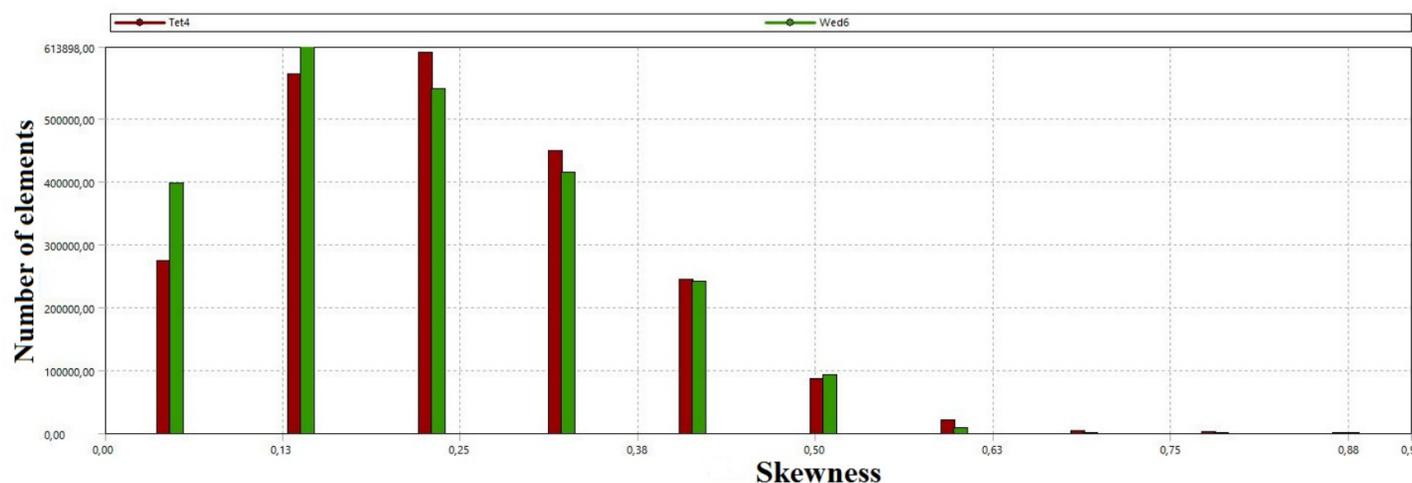


Figura 2.37 Valori di skewness della mesh della simulazione coupling

Orthogonal Quality – è un parametro geometrico fondamentale, che attesta la qualità della cella. Il valor medio ottenuto è circa 0.76, ovvero abbastanza vicino a 1 che rappresenta la condizione ideale; nel grafico in Figura 2.38 possiamo vedere il numero di elementi per diversi valori di orthogonal quality.

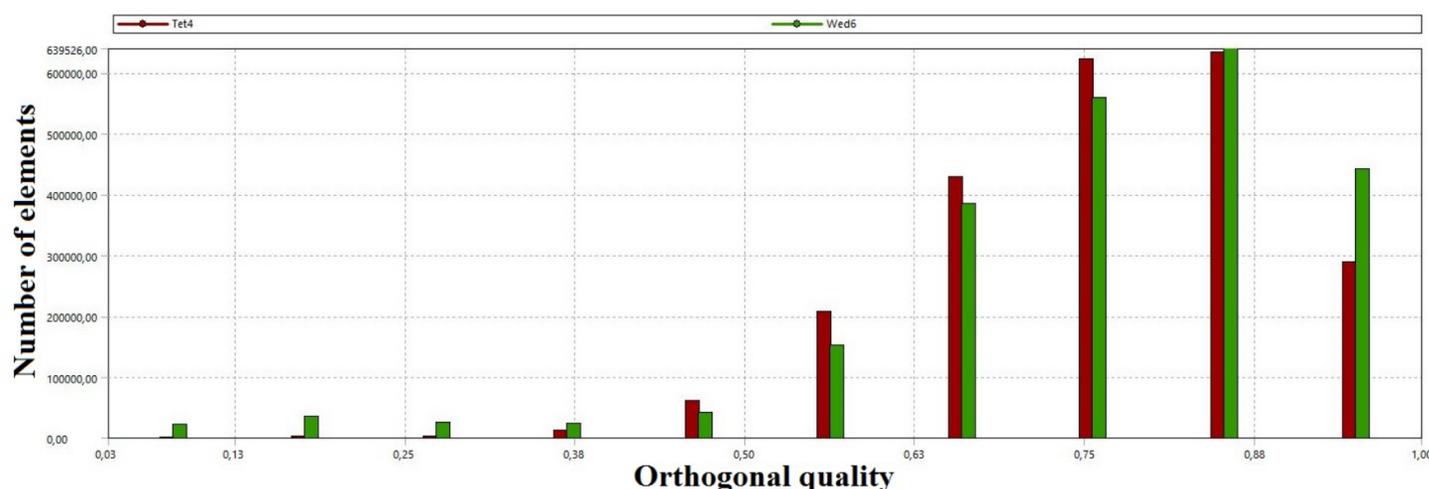


Figura 2.38 Valori di orthogonal quality della mesh della simulazione coupling

SETUP

Vediamo ora come sono stati settati i parametri nel menù “Setup” delle simulazioni. Saranno specificate tutte le modifiche fatte rispetto ai settaggi di default.

Nelle simulazioni sono stati considerati gli effetti di gravità, fondamentali nella fase di dispersione: in “General” è stata spuntata la voce “Gravity” impostando un valore di accelerazione di gravità sull’asse y di -9.81 m/s^2 ed è stata impostata l’opzione “steady-state” per effettuare le simulazioni in stazionario.

Nel menù “Models” sono stati settati i seguenti parametri:

- Energy (On): equazione dell’energia attivata;
- Viscous (SST k- ω): modello di turbolenza SST k- ω ;
- Species (Species Transport): il trasporto delle specie è stato attivato selezionando la miscela aria-metano (methane-air), che verrà trattata come incomprimibile (opzione già settata per default).

A questo punto, nel menù a cascata “*Boundary conditions*” sono state settate le condizioni al contorno in questo modo:

- “*Velocity inlet*” per la piattaforma sulle facce esposte a Nord-Ovest (Figura 2.39)

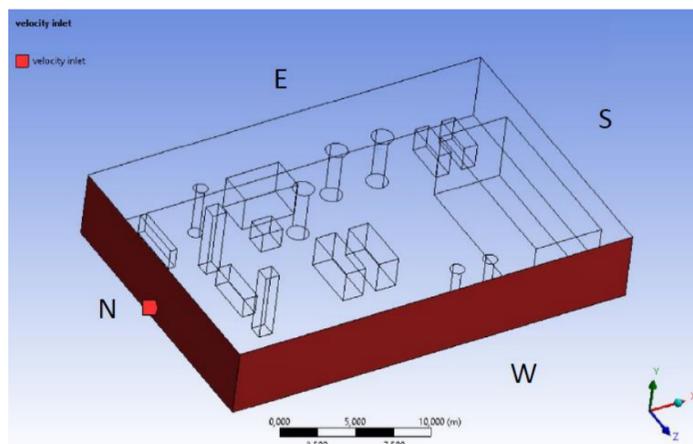


Figura 2.39 Pareti della piattaforma su cui è impostata la condizione di “*Velocity inlet*”

con la velocità settata usando la modalità “*Magnitude and Direction*”; il valore della velocità è stato imposto pari a 6 m/s e la direzione è data dal vettore: $x=0.5$, $y=0$, $z=-0.5$, per avere una inclinazione di 45° sul piano XZ come da Figura 2.40.

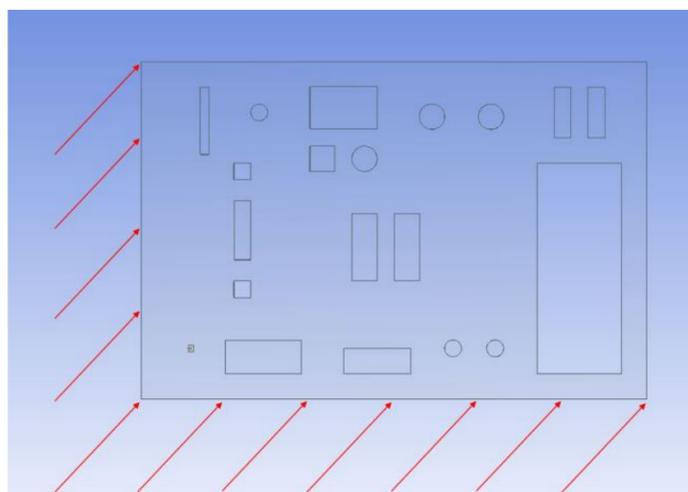


Figura 2.40 Direzione del vento incidente sulla piattaforma

- “*Pressure Outlet*” sulle facce a Sud-Est (Figura 2.41).

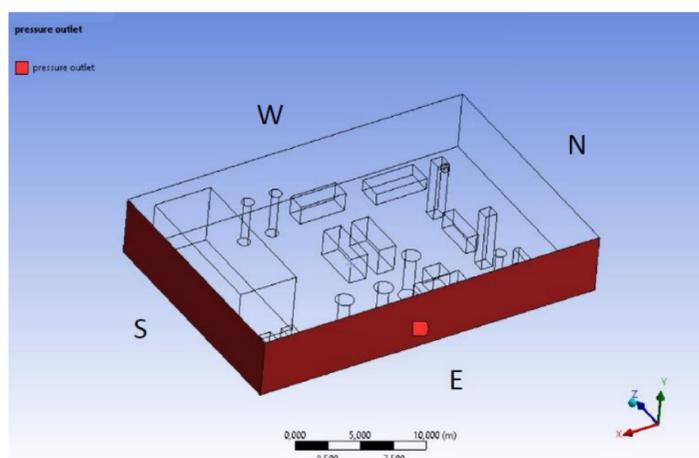


Figura 2.41 Pareti della piattaforma su cui è impostata la condizione di: “*pressure outlet*”

in cui è stata impostata una “*Gauge Pressure*” di 0 Pa, che equivale ad una pressione assoluta di 1 atm.

Su tutte le altre pareti, tranne quelle di interfaccia SB-piattaforma, viene impostata una condizione di “*wall*”, ovvero sono tutte intese come pareti impenetrabili con condizioni di “*no slip*”; questo significa che il fluido non può “scivolare” su di esse, ma risentirà della loro presenza e si genereranno degli sforzi di taglio che daranno vita ad un “*boundary layer*” (strato limite). Le altre condizioni di *inlet* saranno specificate nel prossimo paragrafo poiché differiscono per ogni simulazione.

2.4.4 Impostazione BCs interfaccia SB/piattaforma (SET 1, SET 2, coupling)

Tutte le simulazioni (dei due sets e coupling) hanno le stesse impostazioni illustrate precedentemente a parte le condizioni di *inlet* dell'interfaccia SB/piattaforma. Tali condizioni sono imposte sulle facce della piattaforma corrispondenti a quelle di output della source box; in questo caso la source box è come una “black box” dal punto di vista della piattaforma, poiché non è specificato cosa accade dentro, ciò che si conosce sono solo i valori sulle sue facce.

Per effettuare i vari sets di simulazioni è stato necessario innanzitutto raccogliere i risultati dalla simulazione della fase di rilascio, in varie forme, ovvero sono stati estrapolati sia i profili effettivi di uscita che dei valori medi. Per prima cosa è utile vedere in Figura 2.42 quali sono le facce sulle quali vengono imposte tali condizioni.

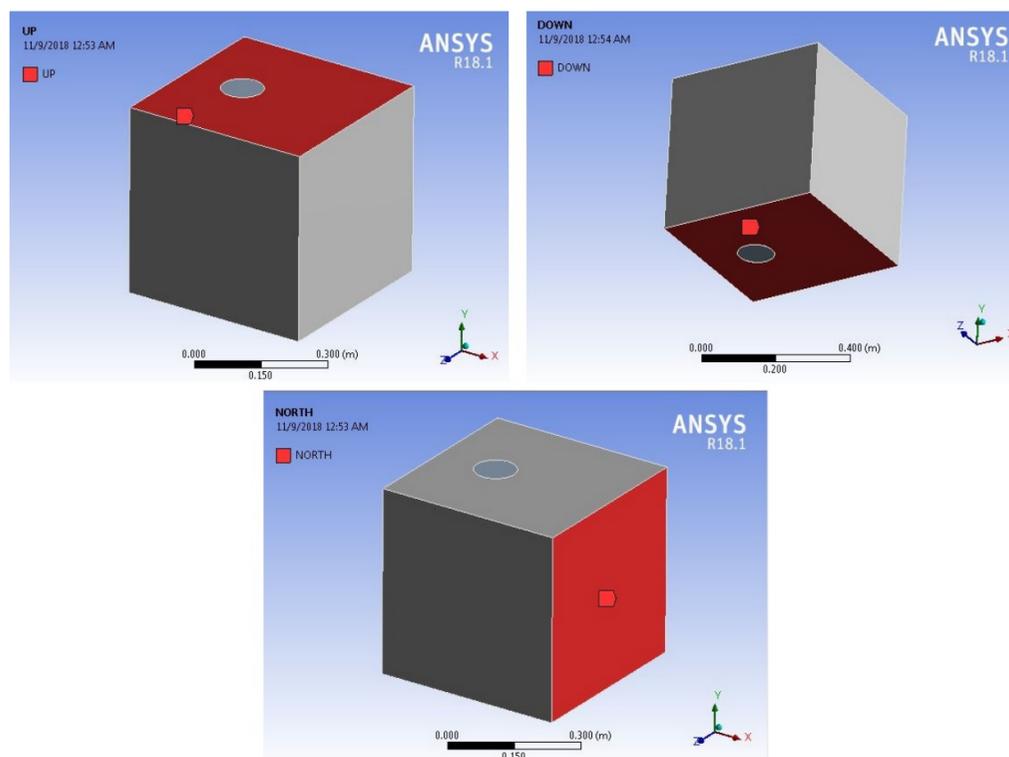


Figura 2.42 Facce di inlet interfaccia source box/piattaforma (up, down, north)

Le facce sulle quali si andranno ad imporre le condizioni al contorno di *inlet* sono tre: down, up e north. Per ogni SET i valori di velocità e frazione massica di CH₄ saranno dati in maniera differente come specificato di seguito.

I valori medi sono stati estrapolati dalla simulazione di rilascio, e sono stati ottenuti usando la funzione “ave” del menù “*function calculators*” presente nell’ambiente “*Results*” della simulazione. Sono stati calcolati i valori medi di velocità e frazione massica di metano per tutte le facce di interesse. In Tabella 2.2 e in Tabella 2.3 sono riportati i valori medi delle grandezze di interesse estrapolati dalle varie facce di output.

Facce	Frazione in massa di metano
North	0.0273789
Up (Down)	0.0276009

Tabella 2.2 Valori medi frazione in massa di metano

	Modulo velocità [m/s]	Comp. X della velocità [m/s]	Comp. Y della velocità [m/s]	Comp. Z della velocità [m/s]
North	11.9136	/	/	/
Up	/	5.06174	8.08564	0.711008
Down	/	5.06174	-8.08564	0.711008

Tabella 2.3 Valori medi velocità

La faccia down è per simmetria corrispondente a quella soprastante per cui i valori sono gli stessi; l'unica differenza si trova nella componente y della velocità che è negativa per simmetria.

Vediamo nel dettaglio come sono state impostate le BCs, che saranno di tipo “*velocity inlet*”, sulle facce di contatto SB-piattaforma per ogni simulazione dei due SET e per la simulazione di coupling.

SET 1

Il valore di frazione massica di CH₄ è tenuto uniforme ed uguale al rispettivo valor medio su ciascuna delle facce come da Tabella 2.2 in tutte e tre le simulazioni di questo set.

- *Simulazione 1*: il valore della velocità è uniforme ed è posto uguale al corrispettivo valor medio sulle facce come da Tabella 2.3;
- *Simulazione 2*: il valore della velocità è stato assegnato discretizzando le varie facce ed assegnando ad ogni “pezzo” un diverso peso come illustrato in Figura 2.43 e Figura 2.44.

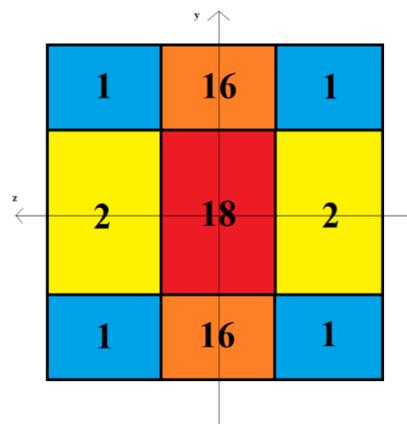


Figura 2.43 Distribuzione dei pesi del profilo di velocità discretizzato faccia north

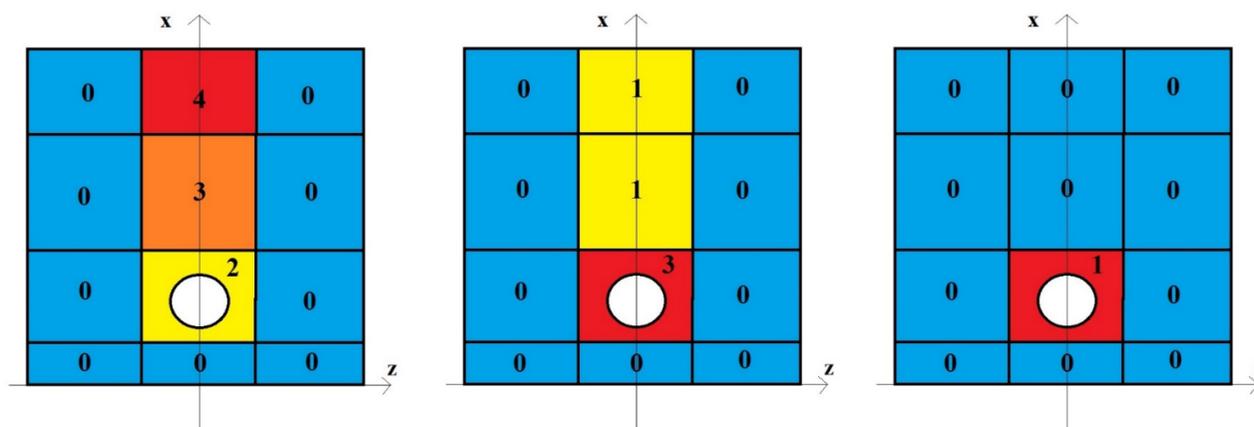


Figura 2.44 Distribuzione dei pesi dei profili di velocità (componenti u, v, w da sinistra a destra) discretizzati facce up e down

I pesi per la faccia down sono i medesimi della faccia up se non che assumono valore negativo per la componente y della velocità.

Il criterio con cui sono stati assegnati i valori pesati è basato sulla conservazione del valor medio integrale; in formule:

$V_m \left[\frac{m}{s} \right]$ è la velocità media;

$A_{tot} [m^2]$ è l'area totale della faccia;

$A_i [m^2]$ è l'area di ogni cella della discretizzazione;

$V_i \left[\frac{m}{s} \right]$ è la velocità su ogni cella;

P_i è il peso assegnato a ciascuna cella;

$V_{min} \left[\frac{m}{s} \right]$ è una costante che servirà nel calcolo di V_i ;

e data: $V_i = P_i \cdot V_{min}$

deve valere la seguente uguaglianza:

$$V_m \cdot A_{tot} = \sum_{i=1}^N V_i \cdot A_i \quad \text{con } N = \text{numero elementi}$$

dalla quale si può ricavare V_{min} e, dunque, tutte le velocità su ogni cella in base ai relativi pesi.

- Simulazione 3: sono stati usati i profili continui di velocità estrapolati dalle facce di output della source box, visibili in Figura 2.45 e Figura 2.46.

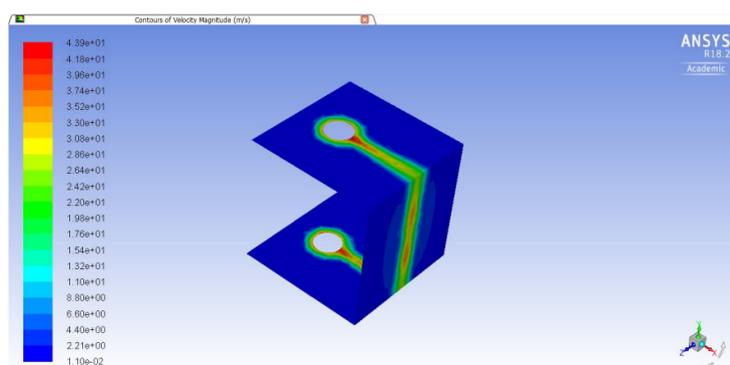


Figura 2.45 Profilo dettagliato del modulo di velocità su tutte le facce (up, down, north)

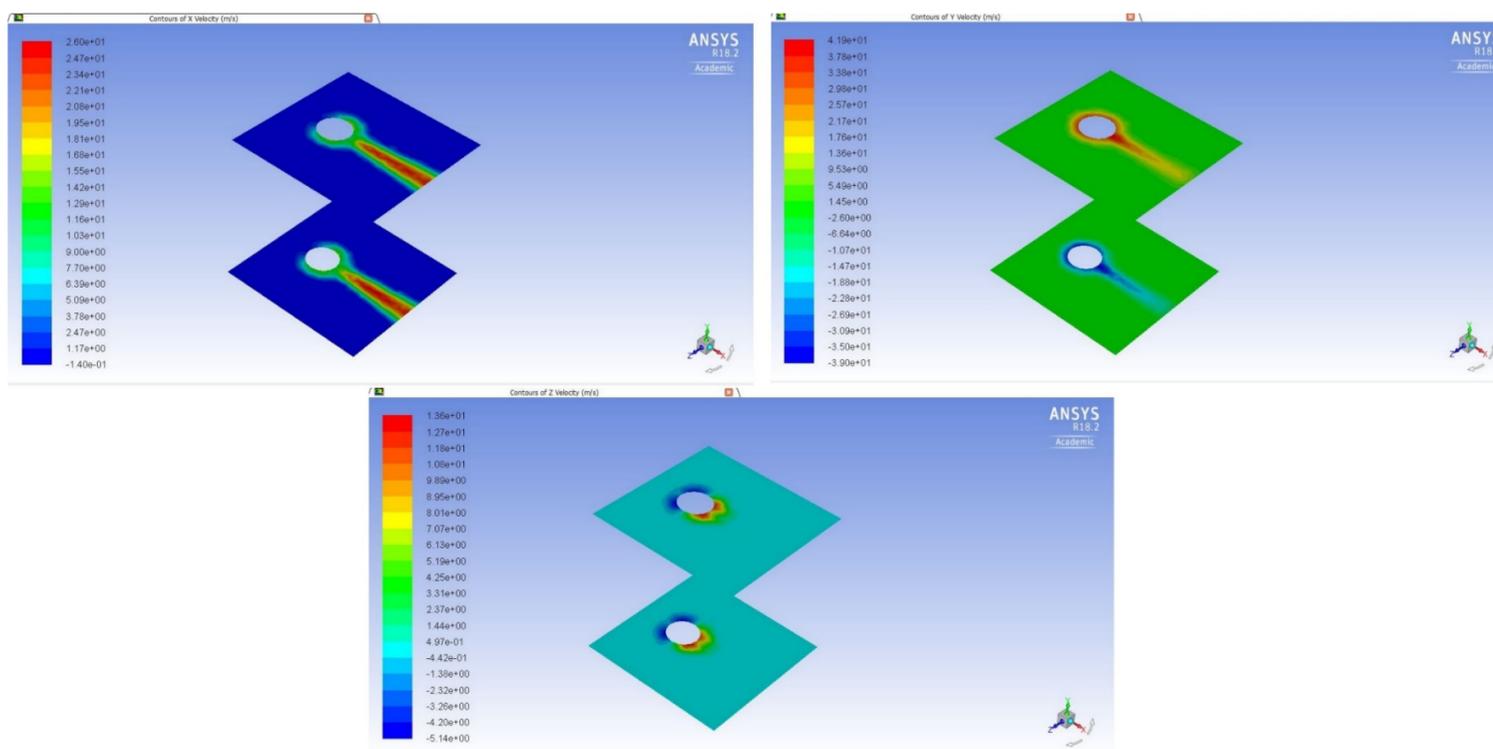


Figura 2.46 Profili dettagliati delle componenti di velocità (u,v,w) sulle facce up e down

SET 2

Il valore di velocità è tenuto uniforme ed uguale al rispettivo valor medio su ciascuna delle facce come da Tabella 2.3 in tutte e tre le simulazioni di questo set.

- Simulazione 4: il valore della frazione massica di CH_4 è uniforme ed è posto uguale al corrispettivo valor medio su ciascuna delle facce come da Tabella 2.2;
- Simulazione 5: il valore della frazione massica di CH_4 è stato assegnato discretizzando le varie facce ed assegnando ad ogni “pezzo” un diverso peso come illustrano Figura 2.47 e Figura 2.48.

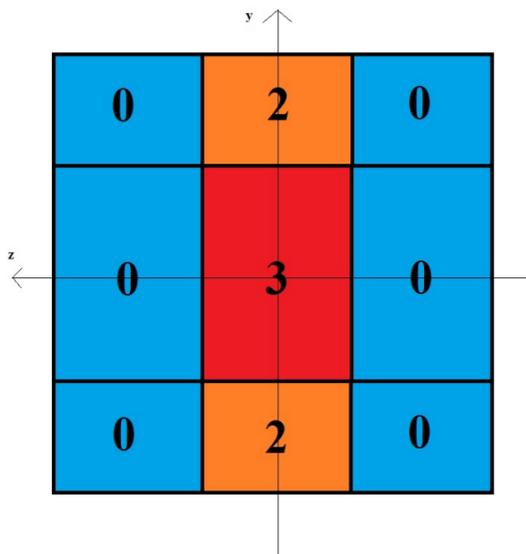


Figura 2.47 Distribuzione dei pesi del profilo discretizzato della frazione massica di metano faccia north

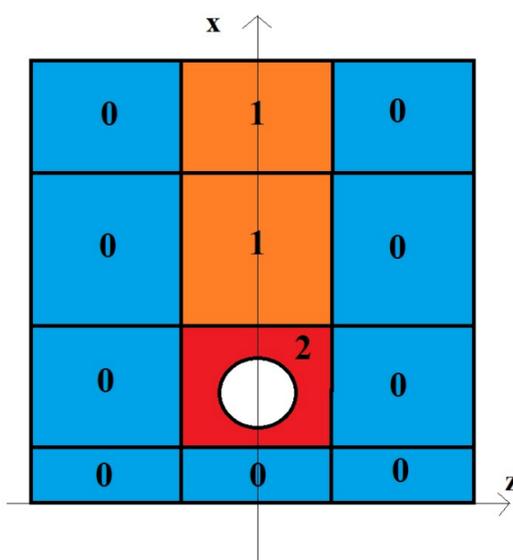


Figura 2.48 Distribuzione dei pesi del profilo discretizzato della frazione massica di metano faccia north

Anche in questo caso, come nella simulazione 2, i valori pesati sono stati assegnati mantenendo costante il valore della media integrale sulla faccia, dunque la formula usata è analoga a quella illustrata nel caso della simulazione 2.

Simulazione 6: in questo caso sono stati usati i profili dettagliati di frazione massica di CH_4 (Figura 2.49).

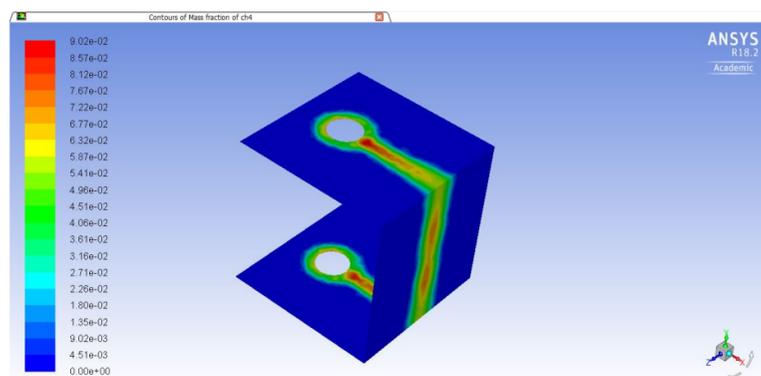


Figura 2.49 Profilo dettagliato della frazione massica di metano su tutte le facce

Simulazione “coupling”

In questo caso sono stati usati tutti i profili continui sia di velocità che di frazione massica di CH_4 (Figura 2.45, Figura 2.46, Figura 2.49).

Capitolo 3 ANALISI RISULTATI STUDIO SENSITIVITA'

In questo capitolo verranno analizzati i risultati ottenuti dalle precedenti simulazioni. Verranno messe a confronto diverse grandezze di interesse: il volume totale di metano rilasciato, quello entro i limiti di infiammabilità e le aree interessate dalla nube di infiammabile. Inoltre si analizzeranno dal punto di vista grafico le diverse nubi di gas disperso nella piattaforma per comprendere quali ostacoli ne sono lambiti nei diversi casi. Oltre ad un confronto tra le varie simulazioni di uno stesso set, vi sarà un confronto tra i due set e la simulazione coupling, in modo da vedere se e come le varie approssimazioni introdotte (utilizzando valori medi o discretizzazioni grossolane) possano inficiare la veridicità del risultato introducendo sottostime pericolose o inutili sovrastime.

I primi valori sui quali si può fare un confronto sono i volumi totali di gas rilasciato, quelli nei limiti di infiammabilità e le aree totali interessate dalla nube. La Tabella 3.1 illustra tutte le suddette grandezze per ogni simulazione.

		Volume totale CH ₄ [m ³]	Volume infiam. CH ₄ [m ³]	Area interessata [m ²]
SET 1	Simulazione 1	0.526645	0	0.317582
	Simulazione 2	0.498584	4.9e-5	0.451472
	Simulazione 3	0.180793	6.0e-5	0.113325
SET 2	Simulazione 4	0.526645	0	0.317582
	Simulazione 5	0.49882	0.015326	0.269869
	Simulazione 6	0.180682	0.002265	0.108256
	Coupling	0.35632	0.004867	0.212449

Tabella 3.1 Valori simulazioni SET 1,2 e coupling

Prima di commentare i risultati è utile rappresentarli graficamente. Nell'analisi dei risultati si assume che la simulazione coupling sia quella più accurata in quanto fa uso di tutti i profili dettagliati; per questo si è deciso di confrontare i valori ottenuti nei due set con quelli del coupling in ciascuno dei grafici seguenti.

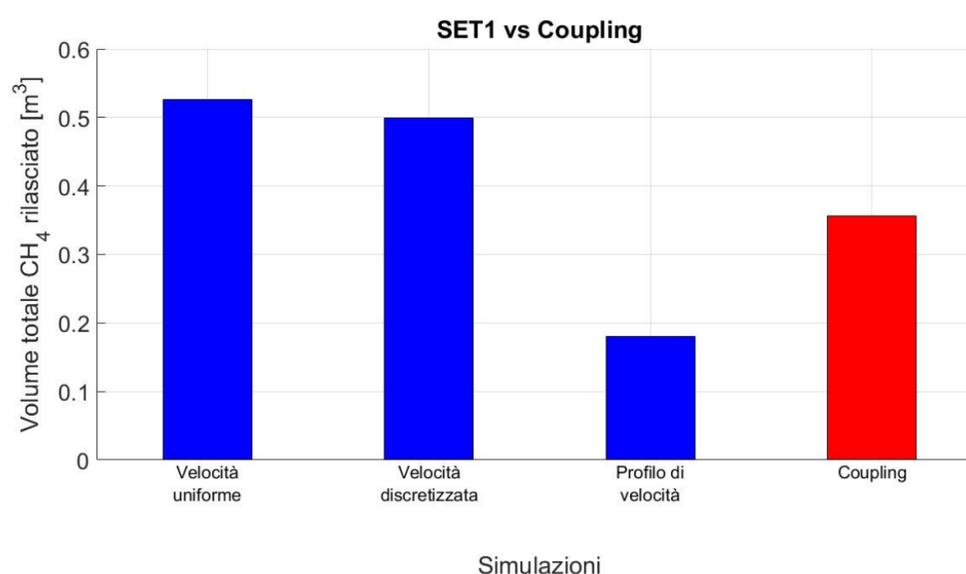


Grafico 3.1 Le tre simulazioni del SET1, caratterizzate da frazione in massa di CH₄ uniforme sulle facce di input (down, up e north), presentano invece tre caratterizzazioni diverse del profilo di velocità: uniforme, discretizzato e continuo; in questo grafico il volume totale di metano rilasciato nei tre casi viene messo a confronto con quello ottenuto nel coupling.

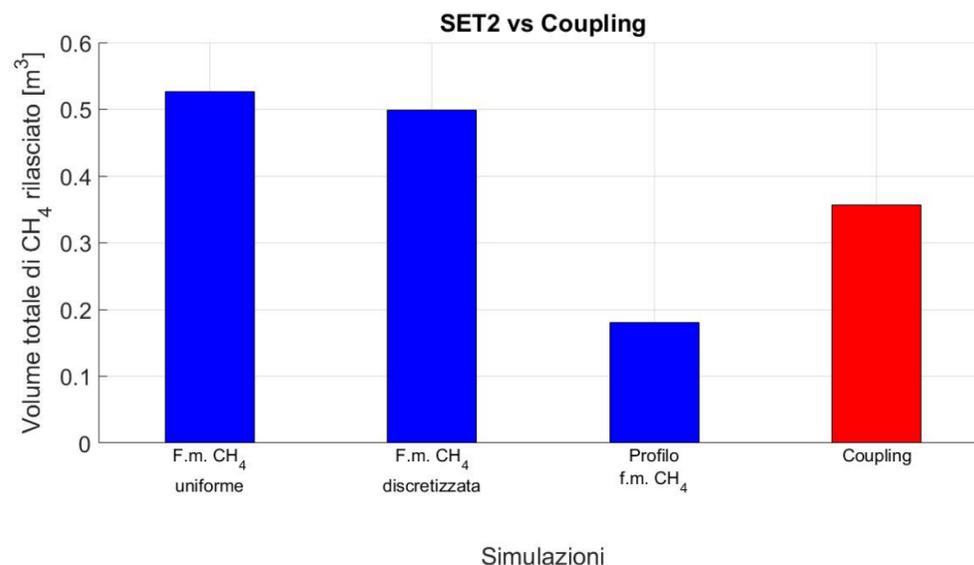


Grafico 3.2 Le tre simulazioni del SET2, caratterizzate da profilo di velocità uniforme sulle facce di input (down, up e north), presentano invece tre caratterizzazioni diverse del profilo di frazione in massa di CH₄: uniforme, discretizzato e continuo; in questo grafico il volume totale di metano rilasciato nei tre casi viene messo a confronto con quello ottenuto nel coupling.

Come si può vedere da questi due grafici gli andamenti del volume totale di metano rilasciato sono molto simili nei due casi rappresentati; allo stesso modo anche i valori sono del tutto analoghi nei due casi. Nel Grafico 3.1 possiamo notare che, all'aumentare della raffinatezza del profilo di velocità, il volume tende a decrescere; ciò si può spiegare considerando che, dato un valore di frazione in massa uniforme sulle facce, la velocità uniforme porta a “trasportare” dentro il dominio una grande quantità di gas anche se ad una velocità piuttosto bassa; se invece si considera un profilo più accurato di velocità ci saranno porzioni delle facce in cui la velocità è molto alta e molte altre in cui è pressoché nulla, dunque verrà trasportata meno quantità di gas, ma a velocità molto alta, facendo sì che raggiunga regioni più lontane. Nel Grafico 3.2, l'andamento decrescente del volume totale di infiammabile è spiegabile con un ragionamento analogo; per spiegare il concetto è utile introdurre il termine “importanza”: in questo caso possiamo dire che le zone con frazione in massa di CH₄ elevate, siano più importanti delle altre. Premesso questo, possiamo dedurre che nel caso della simulazione con frazione in massa uniforme l'importanza sia uguale per tutti i punti, ma bassa, mentre nel caso in cui si ha il profilo dettagliato vi sono zone con elevata importanza ed altre in cui essa è zero (perché la frazione in massa di metano è pari a zero). Avere una velocità uniforme, come nel SET 2, significa trasportare in tutti i casi la sostanza allo stesso modo, ma mentre nel primo caso si ha bassa importanza ma diversa da zero in tutti i punti, nel terzo si hanno molte zone in cui essa è zero, e ciò fa decrescere notevolmente il volume totale rilasciato.

Andiamo ora ad analizzare i valori di volume di gas nei limiti di infiammabilità, che sono:

- LFL 5 % (in volume) → 0.0276 in massa;
- UFL 15 % (in volume) → 0.083 in massa.

In questo caso gli andamenti per i due set sono molto differenti; nel caso del SET 1 (Grafico 3.3) il valore è pericolosamente sottostimato, e ciò è comprensibile poiché il valor medio sulle facce è 0.027 (Tabella 2.2), ovvero molto vicino all' LFL. In questo caso, il fatto di mediare il valore sulle facce è altamente deleterio perché porta ad ignorare che nella realtà vi è una distribuzione in cui il valore massimo di frazione massica può raggiungere lo 0.15.

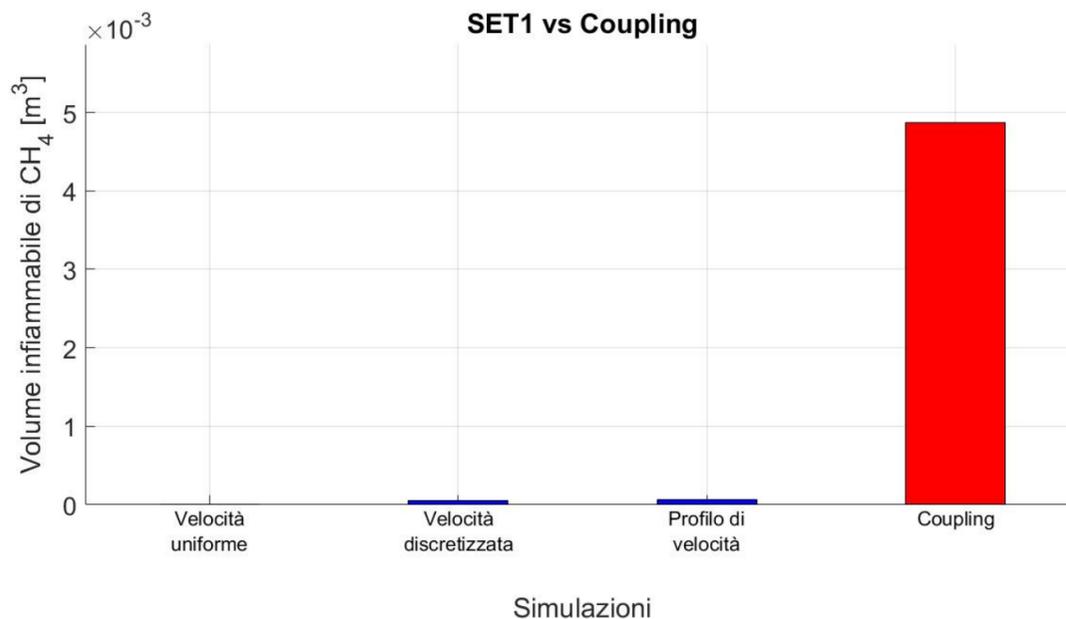


Grafico 3.3 Le tre simulazioni del SET1, caratterizzate da frazione in massa di CH₄ uniforme sulle facce di input (down, up e north), presentano invece tre caratterizzazioni diverse del profilo di velocità: uniforme, discretizzato e continuo; in questo grafico il volume infiammabile di metano rilasciato nei tre casi viene messo a confronto con quello ottenuto nel coupling.

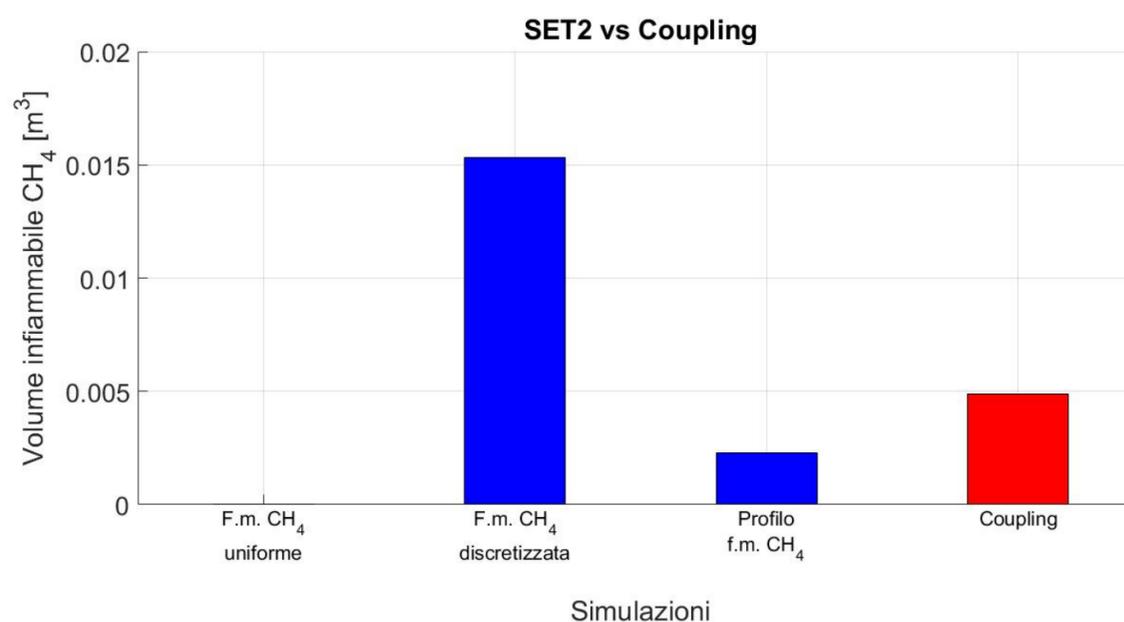


Grafico 3.4 Le tre simulazioni del SET2, caratterizzate da profilo di velocità uniforme sulle facce di input (down, up e north), presentano invece tre caratterizzazioni diverse del profilo di frazione in massa di CH₄: uniforme, discretizzato e continuo; in questo grafico il volume infiammabile di metano rilasciato nei tre casi viene messo a confronto con quello ottenuto nel coupling.

Nel Grafico 3.4 possiamo invece vedere come nonostante si abbia una velocità uniforme, usando il profilo dettagliato di frazione in massa si ottenga un valore dello stesso ordine di grandezza di quello ottenuto col coupling anche se ancora la differenza rimane sostanziale poiché si induce una sottostima del 50 % circa.

Si può senz'altro affermare che usare un valor medio di frazione in massa sulle facce sia altamente pericoloso ed induca sottostime preoccupanti del volume di infiammabile, mentre nel caso di profilo di velocità uniforme i valori sono comunque più "reali", ma non abbastanza da giustificarne l'uso. Si può concludere però che il profilo di frazione massica di CH₄ è quello che gioca il ruolo principale nella stima del volume infiammabile.

L'ultimo parametro che vediamo nei grafici sottostanti è l'area interessata dalla nube nelle varie simulazioni. Nelle prime simulazioni di ogni SET si ha una sovrastima del valore, mentre nel terzo caso di ciascun set si ottiene il contrario. È interessante vedere la differenza tra le seconde simulazioni di ciascun set, in questo caso una velocità discretizzata porta ad un picco del valore, mentre nel caso

della frazione in massa discretizzata si ottiene un andamento monotono decrescente. Il picco si può interpretare considerando che la discretizzazione della velocità, se non fatta con estrema accuratezza, può portare ad una dispersione eccessiva del gas nel dominio.

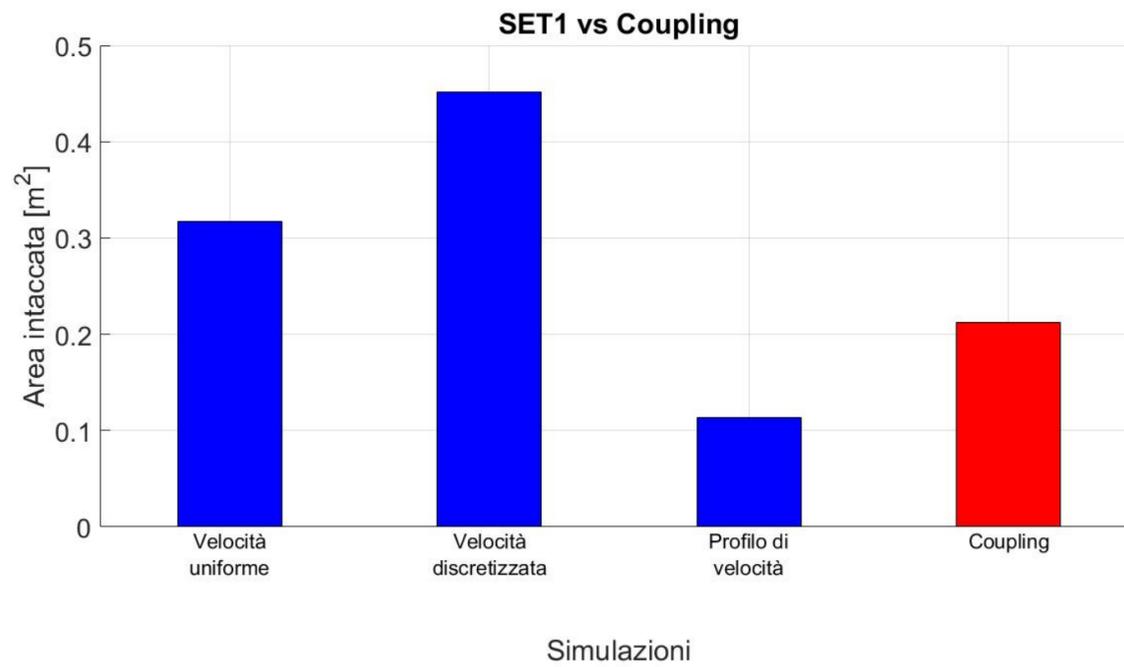


Grafico 3.5 Le tre simulazioni del SET1, caratterizzate da frazione in massa di CH_4 uniforme sulle facce di input (down, up e north), presentano invece tre caratterizzazioni diverse del profilo di velocità: uniforme, discretizzato e continuo; in questo grafico l'area intaccata dalla nube nei tre casi viene messo a confronto con quello ottenuto nel coupling.

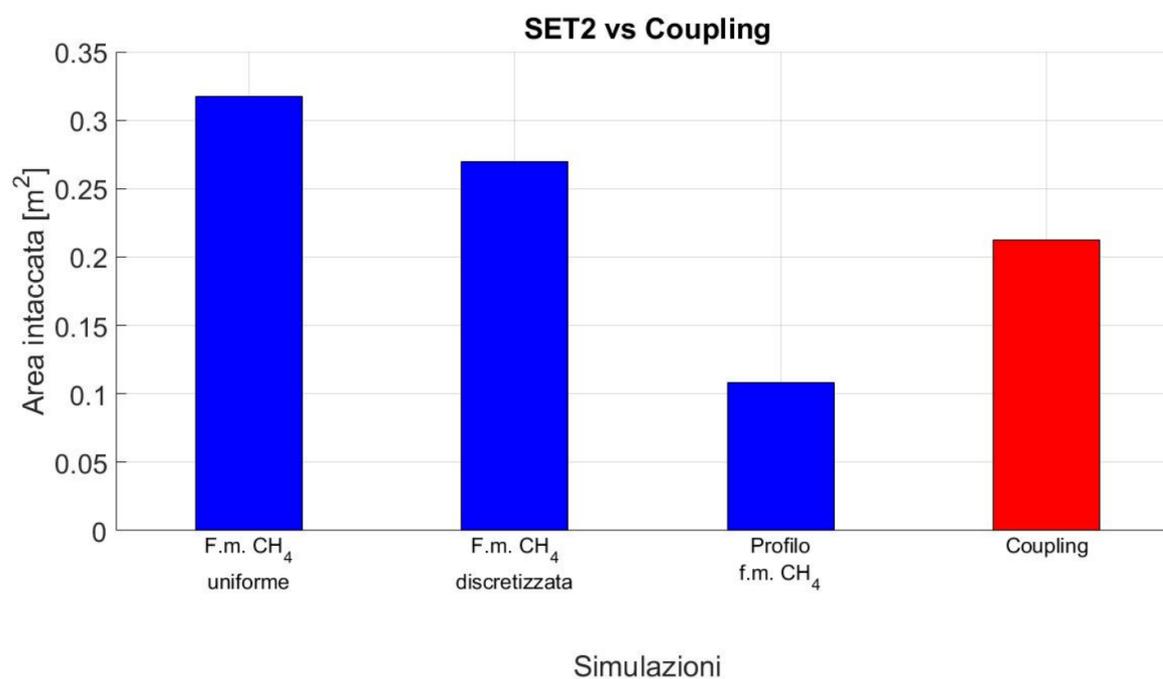


Grafico 3.6 Le tre simulazioni del SET2, caratterizzate da profilo di velocità uniforme sulle facce di input (down, up e north), presentano invece tre caratterizzazioni diverse del profilo di frazione in massa di CH_4 : uniforme, discretizzato e continuo; in questo grafico l'area intaccata dalla nube di gas nei tre casi viene messo a confronto con quello ottenuto nel coupling.

Date le considerazioni prima effettuate, sembra indispensabile che i valori vengano estrapolati ed usati nel modo più preciso possibile, in quanto usare valor medi o discretizzazioni più semplicistiche può portare ad errori importanti.

Possiamo ora vedere un rendering 3D della nube di dispersione all'interno della piattaforma con riferimento alla simulazione coupling in Figura 3.1.

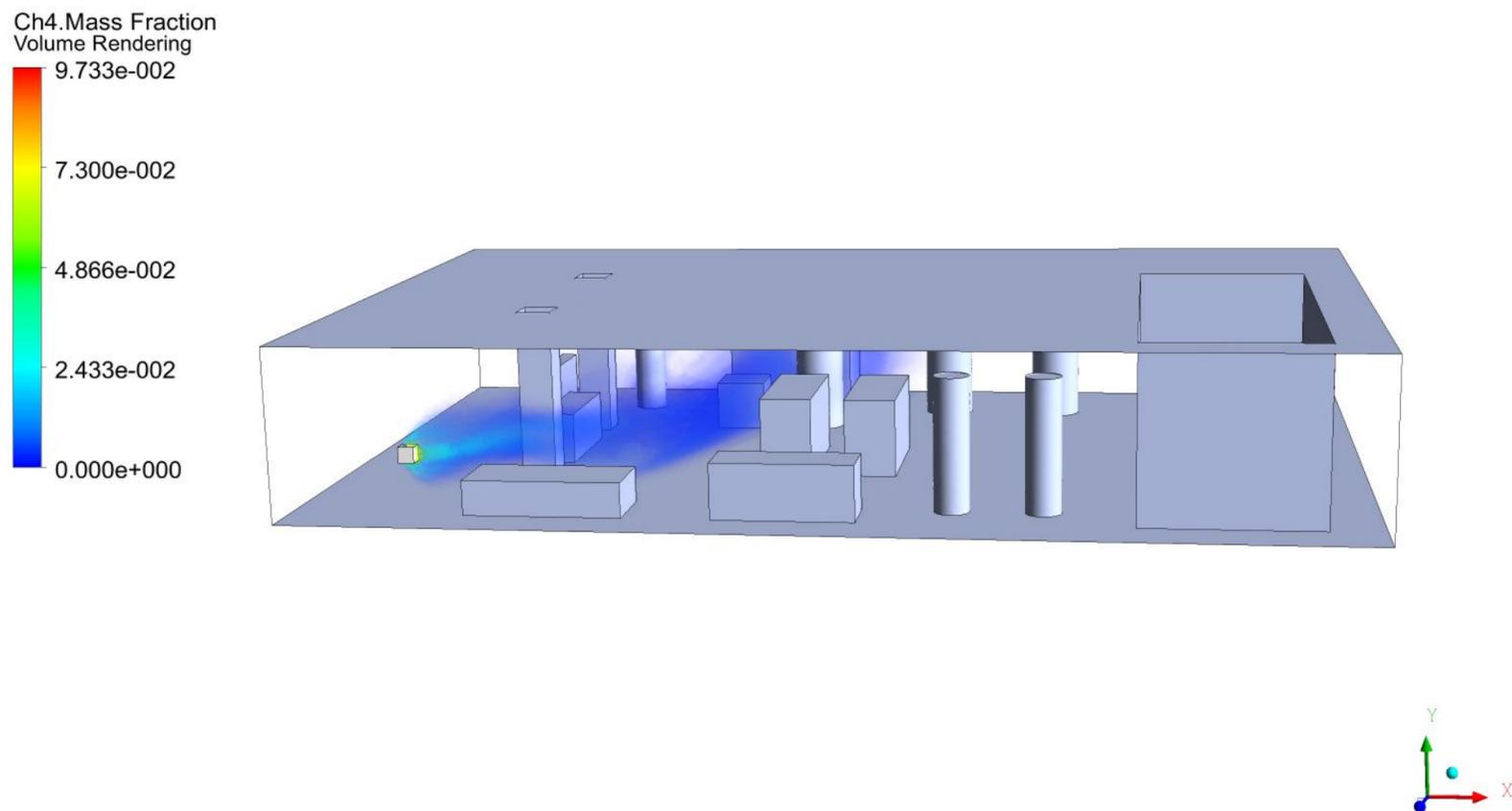


Figura 3.1 Rendering 3D nube di gas della simulazione coupling

Per vedere meglio quali elementi sono “toccati” dal gas, è utile visualizzare una sezione del dominio a metà dell'altezza ($y=1.5$ m); si metteranno ora a confronto grafico tre simulazioni, coupling, simulazione 1 e simulazione 6, la quale rappresenta la situazione più vicina in termini di volume infiammabile, che è il parametro più rilevante per gli scopi di analisi delle conseguenze di un incidente. Sarà ignorato il SET 1 di simulazioni poiché troppo poco realistico.

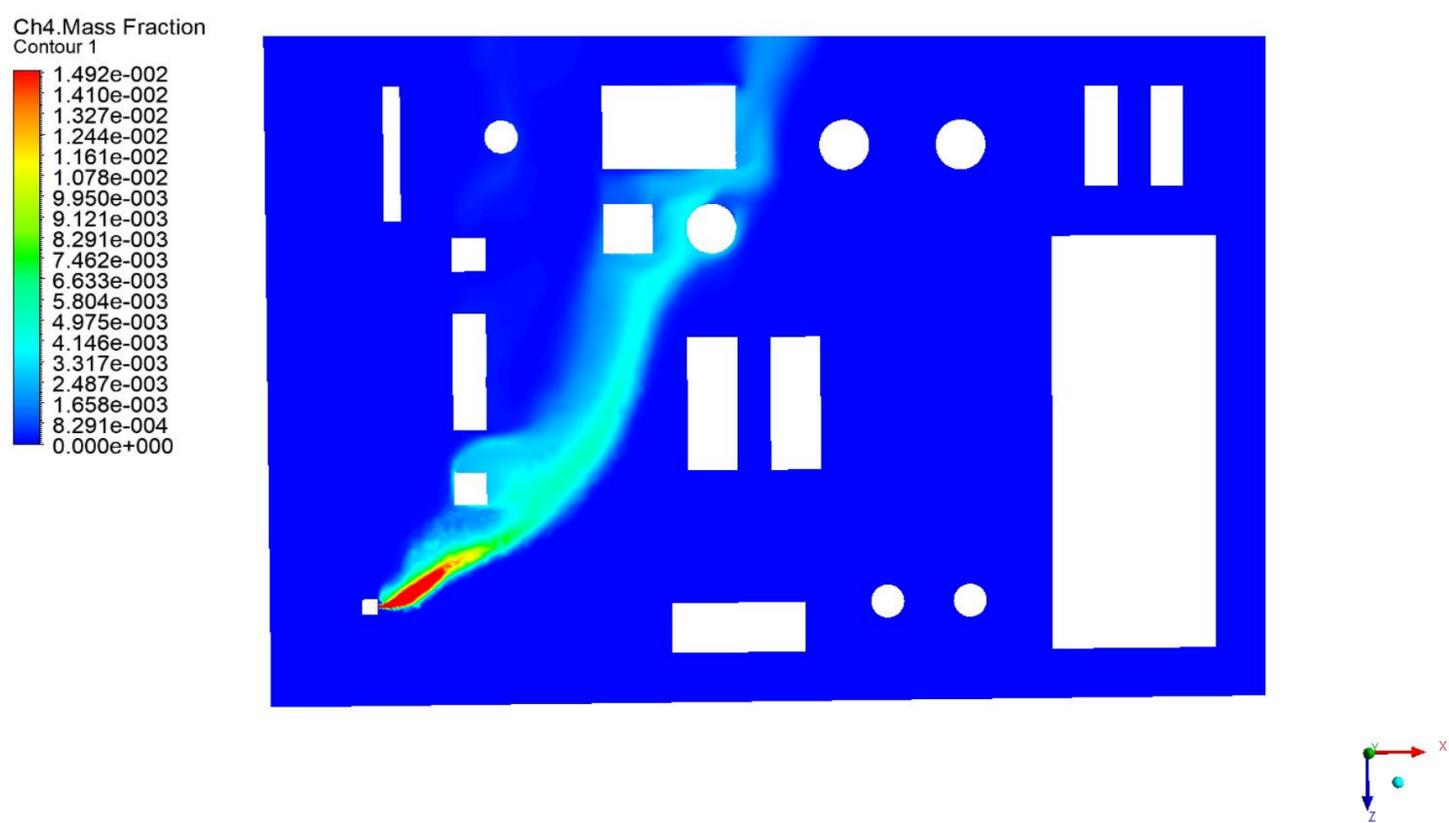


Figura 3.2 Nube di gas della simulazione coupling su un piano trasversale che taglia a metà la piattaforma

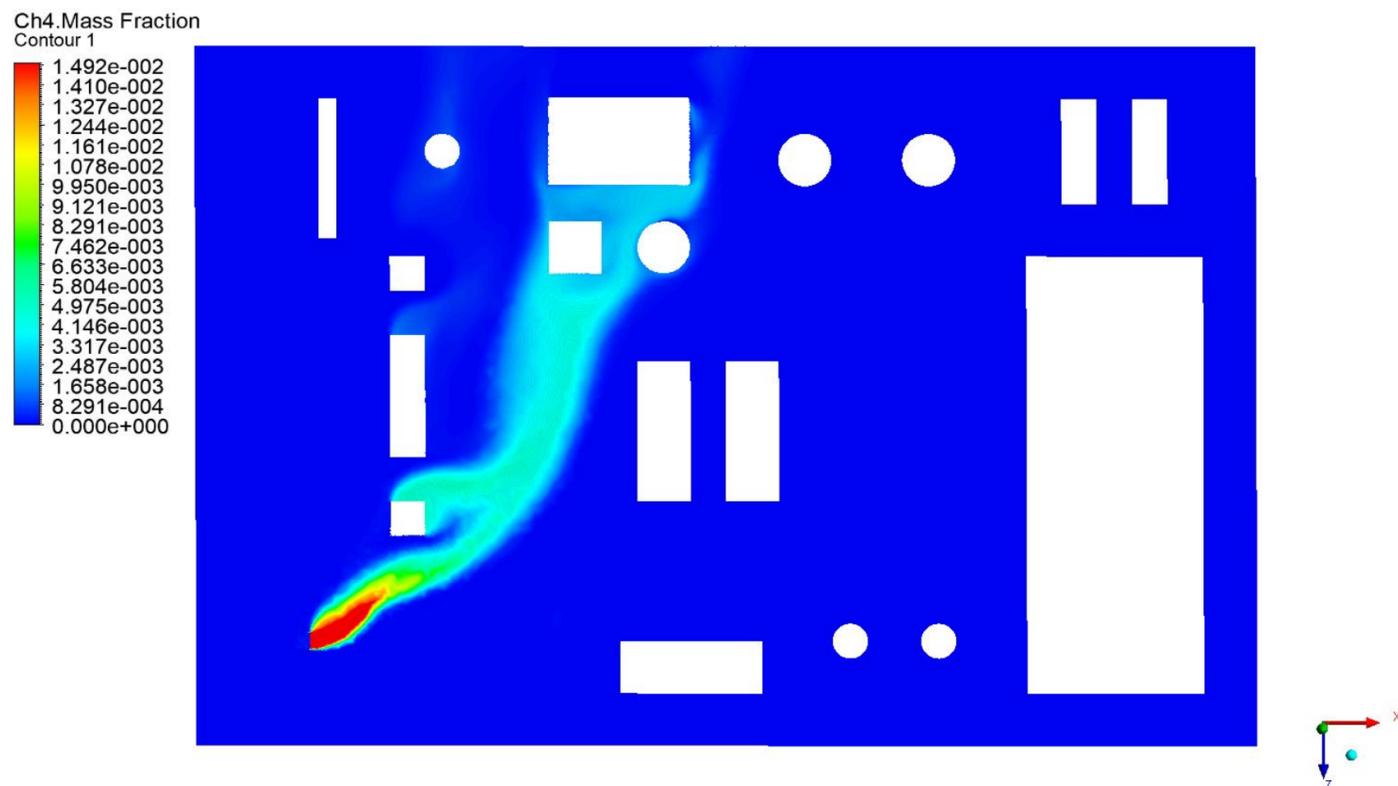


Figura 3.3 Nube di gas della simulazione 1 su un piano trasversale che taglia a metà la piattaforma

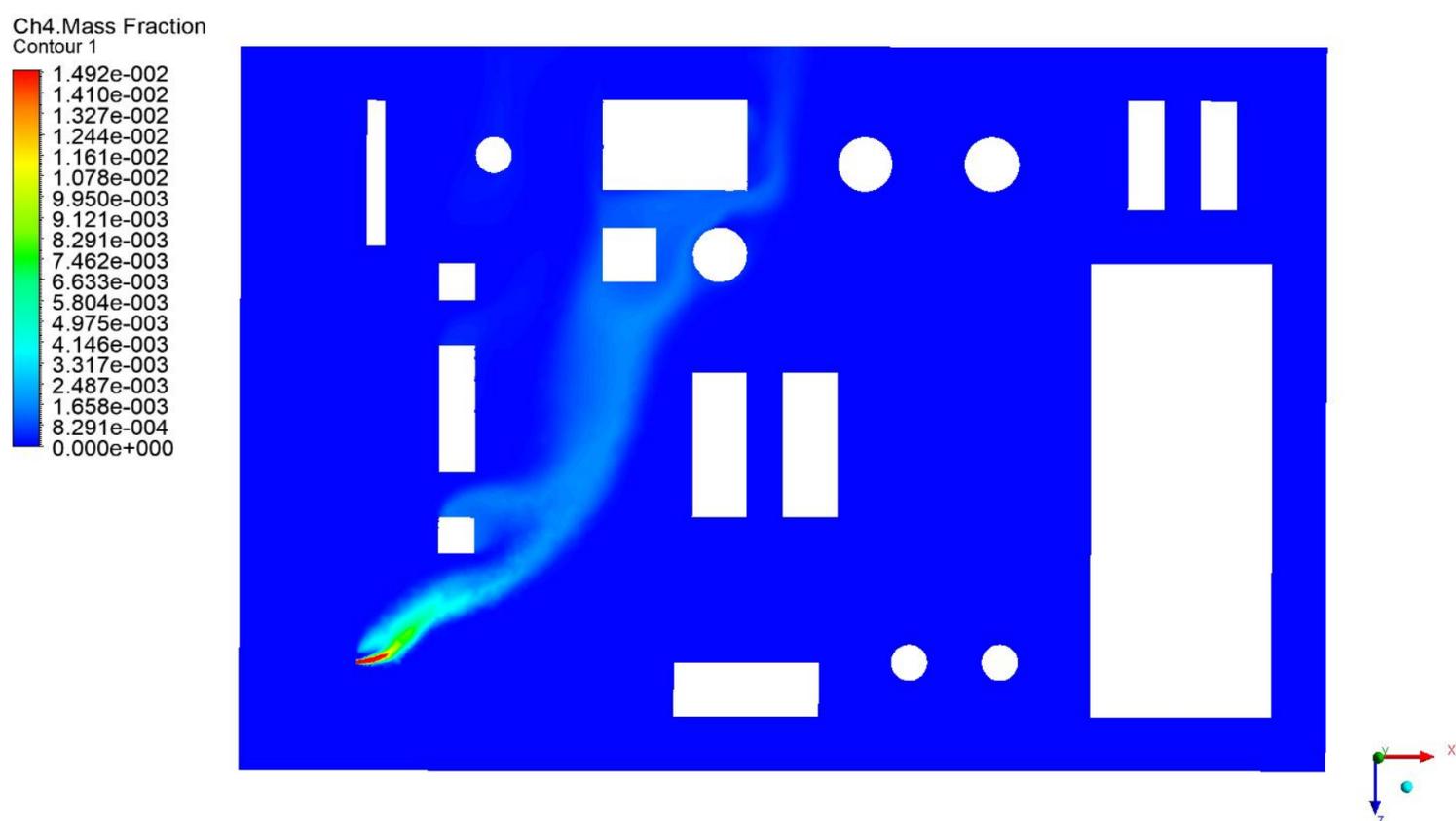


Figura 3.4 Nube di gas della simulazione 6 su un piano trasversale che taglia a metà la piattaforma

Come si può vedere da Figura 3.2 e Figura 3.3 le nubi sono molto simili nei casi delle simulazioni coupling e sim. 1 (valori uniformi sia di velocità che frazione massica di CH_4), anche se nel secondo caso sono lambite più pareti degli ostacoli e si può vedere anche graficamente la sovrastima di volume totale di gas rilasciato e aree interessate. Nel caso della simulazione 6, Figura 3.4, la nube appare molto più ristretta. Se però si pensa che il parametro più importante in termini di sicurezza è il volume di gas nei limiti di infiammabilità, allora la simulazione 1 diventa irrilevante mentre la 6 si avvicina di più al coupling.

Visualizzando la nube infiammabile su un piano trasversale che tagli la piattaforma a metà ($y=1.5$ m) si può fare un confronto visivo diretto:

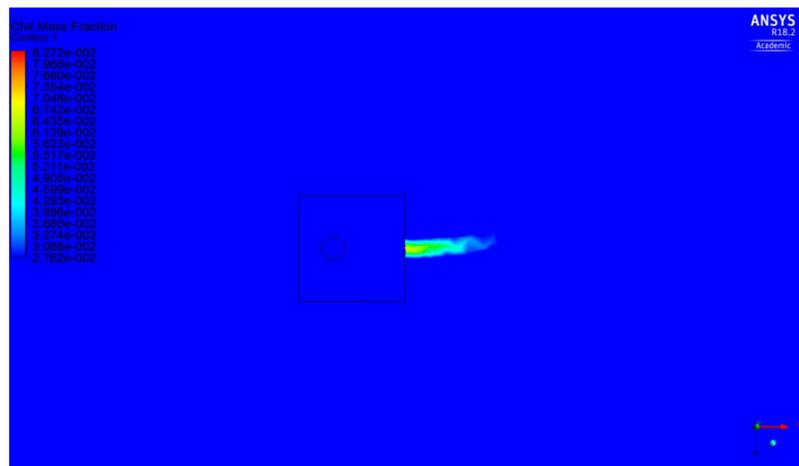


Figura 3.6 Nube di gas infiammabile della simulazione 6 su un piano trasversale che taglia a metà la piattaforma

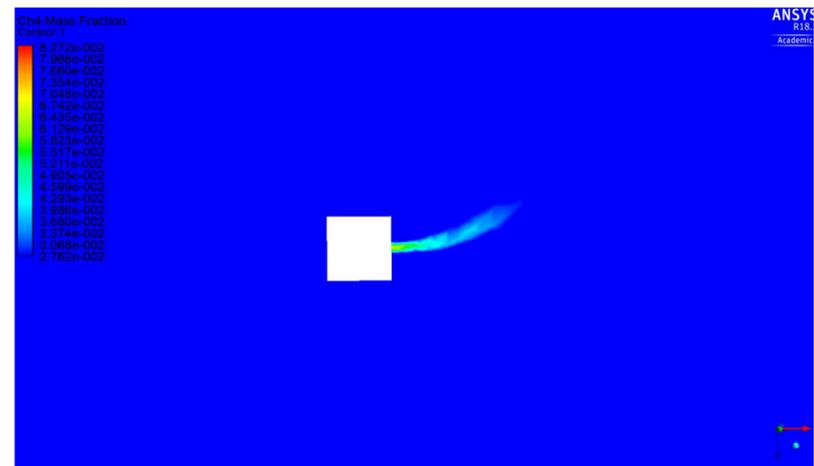


Figura 3.5 Nube di gas infiammabile della simulazione coupling su un piano trasversale che taglia a metà la piattaforma

Si può notare che, nonostante la simulazione 6 sia quella che restituisce il valore più simile al coupling, è comunque troppo imprecisa in quanto la lunghezza della nube appare circa dimezzata, e ciò trova spiegazione nella differenza del valore numerico di volume infiammabile che è di circa il 50%. Alla luce delle considerazioni appena fatte pare ancora più evidente la necessità di effettuare un coupling più preciso possibile per la trattazione del problema.

È interessante inoltre fare un confronto della lunghezza della nube di gas nei limiti di infiammabilità ottenuta nel caso del coupling con quella ottenuta con un calcolo tramite modello parametrico per getti turbolenti liberi. Il modello in questione è il TFJ (Turbulent Free Jet) [33] ed è applicabile in questo caso perché siamo in presenza di un getto turbolento come spiegato in “2.1 Fisica del problema”. Il modello però ha un range di validità cui badare, infatti vi è una soglia spaziale x_{soglia} , che in questo caso vale 20.34 m, oltre la quale non è applicabile; il risultato ottenuto è che l’LFL viene raggiunto a 2.314 m, dunque si può dire che si è nel range di validità e che la lunghezza massima della nube di infiammabile sia appunto 2.314 m. Ovviamente il calcolo appena fatto si riferisce ad un getto libero, mentre nel caso affrontato si ha un ostacolo posto a 10 cm dal punto di rilascio e questo fa sì che si possa fare solo un paragone qualitativo; dalla Figura 3.5 si può fare una stima approssimativa della lunghezza della nube infiammabile ottenuta col coupling, rapportandola alla lunghezza della SB che sappiamo essere 46 cm. Si può stimare che essa si estenda per circa 1.2 m, ovvero circa un metro in meno di quella calcolata col modello parametrico; la differenza è sicuramente dovuta principalmente al fatto di avere un ostacolo nel caso simulato per cui il getto tenderà ad essere smorzato molto prima rispetto al caso in cui fosse libero. In ogni caso il valore ottenuto col coupling, date le considerazioni appena fatte, sembra molto ragionevole.

La Figura 3.7 presenta il campo di velocità ottenuto nel caso del coupling, utile a capire come avvenga il trasporto del gas all’interno della piattaforma e quali siano le velocità coinvolte nella fase di dispersione.

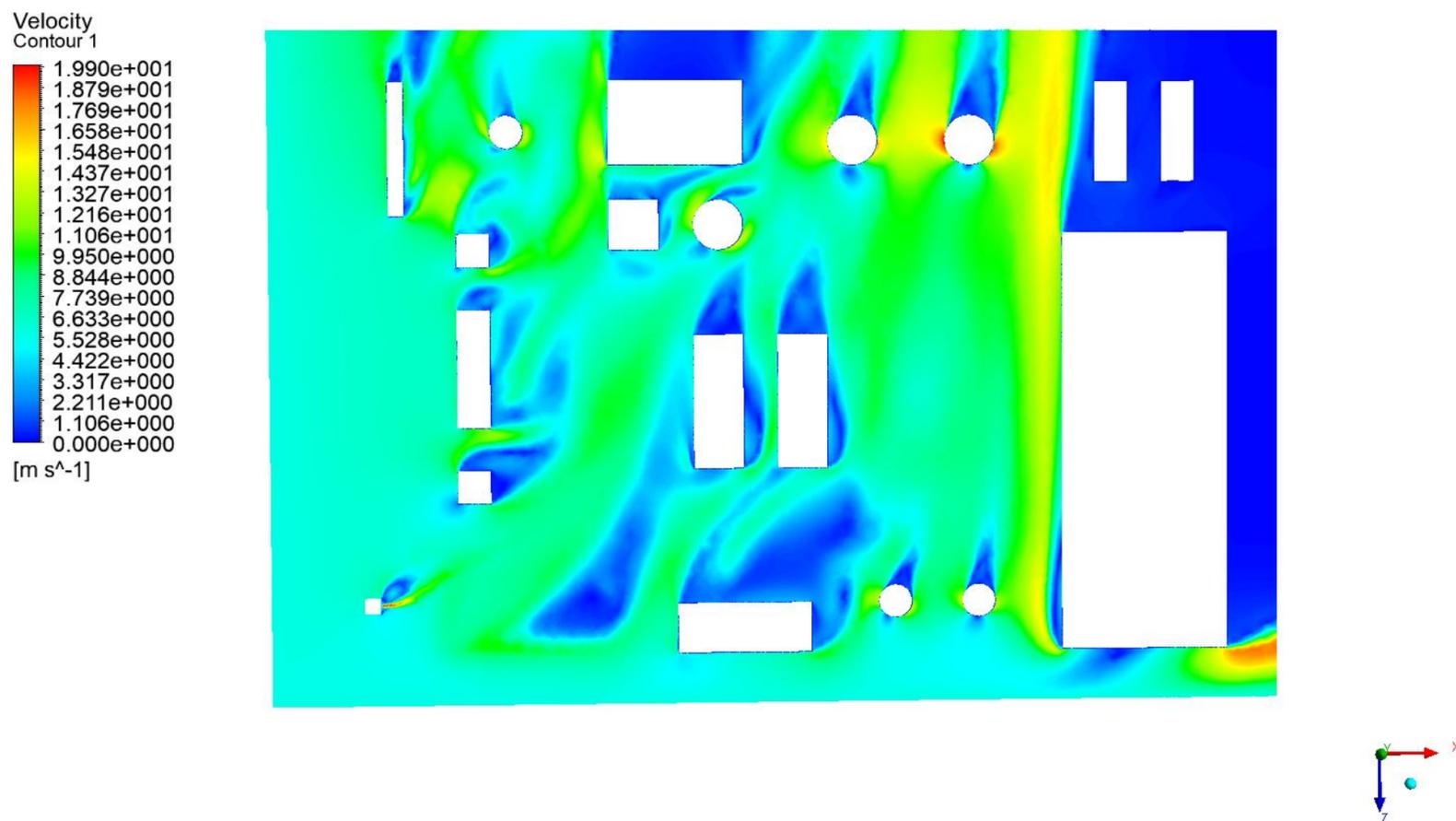


Figura 3.7 Campo di velocità della simulazione coupling su un piano trasversale che taglia a metà la piattaforma

Si può notare il ruolo fondamentale giocato dal vento, infatti la direzione prevalente è proprio concorde alla sua, ovvero 45° da Nord-Ovest, che in componenti vettoriali si può scrivere come (0.5, 0, -0.5).

Capitolo 4 APPROCCIO “ONE STEP”

In questo capitolo verrà illustrato un tentativo di realizzare una simulazione in cui le due fasi, rilascio e dispersione, non sono separate, bensì vengono simulate insieme, per questo verrà definita simulazione “one-step”; si tratterà dunque di un tentativo di approccio “classico” al problema. Saranno spiegati i motivi per cui si è tentata la strada di questo approccio e tutte le criticità e le limitazioni incontrate nel cercare di effettuare tale simulazione. I parametri di base quali la dimensione della piattaforma, il tipo di piattaforma, la posizione del rilascio, la pressione del rilascio, le condizioni del vento ecc. saranno tenuti uguali al caso precedente, ovvero alla simulazione *coupling*, in modo tale da avere una situazione del tutto analoga e dunque poter effettuare un confronto diretto tra i risultati ottenuti. Verranno illustrate le modifiche attuate al CAD di partenza della piattaforma nel quale non sarà più presente la source box, bensì vi sarà direttamente l’ugello che modella il rilascio e di conseguenza il getto sottoespanso conseguente e verrà fatta una panoramica sulle scelte di mesh e modelli utilizzati.

4.1 Introduzione alla simulazione “one step”

La simulazione realizzata in questa sezione segue l’approccio “one-step”, che si potrebbe anche definire *tradizionale*, poiché tutto il fenomeno, in questo caso il rilascio di gas, è simulato dall’inizio alla fine senza scissioni spaziali come avveniva nel caso *two-steps*. La motivazione che ha portato a voler affrontare con tale approccio lo stesso identico fenomeno di rilascio già studiato in precedenza (Capitolo 2) con il metodo a two-steps è quella di effettuare un confronto diretto tra i due metodi, per capire se c’è un motivo reale per preferire uno all’altro o se risultano equivalenti. I parametri su cui fare il confronto sono vari:

- Costo computazionale (a parità di “precisione della mesh”);
- Tempo di calcolo (a parità di macchina usata e “precisione della mesh”);
- Soluzione in termini di volume di gas totale rilasciato, volume infiammabile di gas rilasciato e aree lambite dal gas.

Ovviamente è facile immaginare che ci saranno diverse difficoltà nel realizzare questo tipo di simulazione; riprendendo quanto spiegato nei paragrafi “2.2 Approcci semi-empirici e CFD” e “2.2.1 Source Box nell’approccio “two steps” il fatto di separare spazialmente il fenomeno totale in due fasi diverse è dovuto alla presenza di fenomeni fisici molto eterogenei, infatti se nel primo mezzo metro circa si ha un efflusso sonico con effetti di comprimibilità rilevanti e le forze d’inerzia sono dominanti, nel resto del dominio la velocità è subsonica, la densità si può assumere costante e le forze gravitazionali hanno un ruolo preponderante. Dato tutto ciò, è facile immaginare che una delle difficoltà principali è proprio legata al dover settare dei modelli e dei parametri di risoluzione nel software tali da tener in conto tutti i fenomeni fisici presenti. Un’altra conseguenza di questa eterogeneità fisica riguarda le “lunghezze caratteristiche” coinvolte; nella prima zona del rilascio il “*length-scale*” caratteristico sarà dell’ordine del mm, in quanto è quello tipico di alcuni fenomeni fisici che si generano in questa fase come: i dischi di Mach (tipici di un efflusso comprimibile) e i vortici secondari dovuti al distacco di vena fluida a valle del primo ostacolo (cilindrico) posto molto vicino al getto, che viene dunque impattato quando la turbolenza è molto elevata; d’altro canto dopo una certa distanza gli effetti di comprimibilità svaniscono, l’efflusso diventa subsonico e le forze di galleggiamento dominanti, dunque il “*length-scale*” cambia radicalmente, passando alla decina di cm. Tutto ciò suggerisce di dover adottare rifiniture di mesh diverse a seconda della zona, e questo

rappresenta un'altra criticità incontrata nello sviluppo, cui si darà particolare attenzione nella sezione seguente.

4.2 Punto di partenza e criticità

La prima criticità incontrata nel tentativo di impostare tale simulazione è stata quella di trovare un modo per “modellizzare” l'efflusso da foro all'interno della piattaforma. In [11] tale modellizzazione avveniva tramite un ugello convergente posto a contatto con la source box che servisse per ottenere un getto sotto-espanso e tutti gli effetti annessi quali velocità sonica e formazione dei dischi di Mach; in questo caso però l'ugello è inserito direttamente nel “piattaforma”; dunque si è dovuto affrontare il problema di interfacciare questi due elementi in modo tale che comunicassero nel modo corretto. La strategia è stata quella di posizionare un ugello uguale a quello usato in [11] direttamente nella piattaforma; allo stesso modo è stato piazzato l'ostacolo cilindrico (che prima era all'interno della source box) di fronte all'ugello mantenendo inalterate dimensioni e distanze. L'ugello in questione è “fittizio”, non è realmente presente né modella la forma del foro; esso permette però di modellizzare un efflusso di tipo sonico e le onde di shock dovute alla comprimibilità del fluido; tale espediente è stato introdotto in [52] e successivamente studiato in [11] con ottimi risultati in quanto si è riscontrato che effettivamente la velocità all'uscita è sonica, che l'evoluzione del profilo di pressione è in accordo con le formule della teoria e che le onde di shock sono correttamente modellizzate; data la buona risposta di questo modello con “ugello fittizio” è stato scelto di utilizzare lo stesso espediente anche in questo lavoro di tesi.

L'idea di partenza prevedeva di realizzare una mesh che cogliesse i fenomeni fisici caratterizzati dalla lunghezza caratteristica più piccola, con lo stesso livello di dettaglio raggiunto nell'approccio *two-steps*; come spiegato prima però i fenomeni in questione sono presenti solo nei primi centimetri che nell'approccio *two-steps* sono modellizzati nella source box, che rappresenta il dominio del primo step, il quale è stato ridotto ad un quarto per ragioni di simmetria come si può vedere in Figura 4.1.

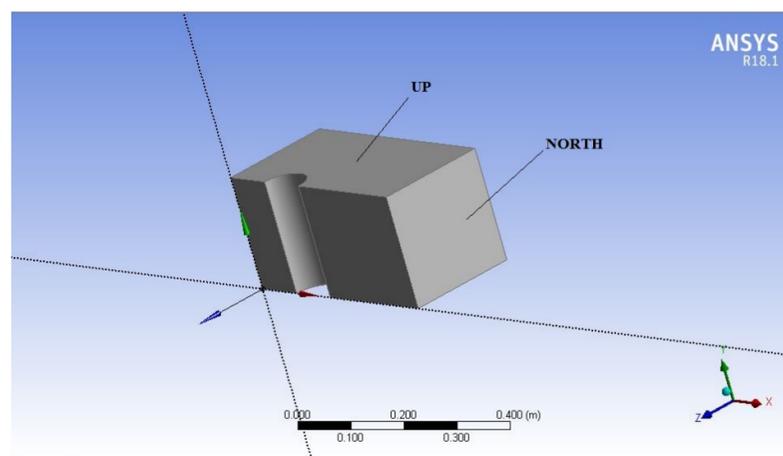


Figura 4.1 CAD source box ridotta

La mesh realizzata in questo dominio, cui si fa riferimento nel Capitolo 2 per estrapolare i dati da dare in input al secondo step, consta di circa $5 \cdot 10^6$ elementi; volendo dunque avere lo stesso livello di dettaglio sull'intera source box si dovrebbero avere circa $20 \cdot 10^6$ elementi. In questo caso però non si ha un dominio a parte per la prima fase del rilascio, ma si deve simulare tutto all'interno della piattaforma, per cui si è provveduto a realizzare un volume di controllo all'interno della piattaforma in cui infittire la mesh come si può vedere in Figura 4.2.

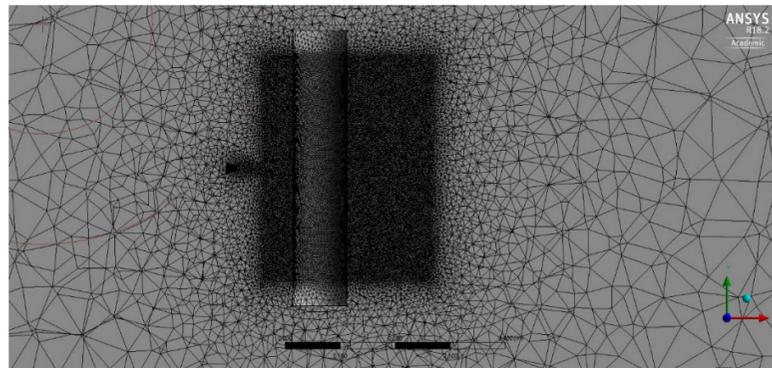


Figura 4.2 Infittimento mesh

Questo infittimento è stato inserito subito a valle dell'ugello, in modo da comprendere la prima fase del fenomeno; si è cercato di ottenere inizialmente lo stesso livello di dettaglio, per cui sono stati generati circa 20 milioni di elementi all'interno del volume in questione, ma ciò ha portato ad avere circa 118 milioni di elementi sulla piattaforma. Il numero così elevato degli elementi totali è dovuto al fatto che la presenza dell'infittimento influenza anche le zone intorno, poiché si deve avere un passaggio graduale dall'elemento più piccolo a quello più grande che caratterizza il dominio all'esterno del volume di controllo. Anche cercando di dimezzare gli elementi dell'infittimento si è ottenuto un valore di elementi totali molto elevato di circa 68 milioni; ricapitolando in Tabella 4.1:

	Volume di controllo	Dominio totale
# elementi 1° tentativo mesh	~20e6	~118e6
# elementi 2° tentativo mesh	~10e6	~68e6

Tabella 4.1 Numero elementi mesh

In tutti e due i casi si è avuto che la macchina a disposizione, le cui caratteristiche sono elencate in Figura 4.3:

Sistema	
Processore:	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2630 v3 @ 2.40GHz 2.40 GHz
Memoria installata (RAM):	64,0 GB
Tipo sistema:	Sistema operativo a 64 bit, processore basato su x64

Figura 4.3 Caratteristiche PC

non fosse in grado di gestire le mesh andando in *crash* nel momento in cui si cercasse di aprire il setup; a questo punto, non avendo la possibilità di ottenere una “raffinatezza della mesh” comparabile a quella dell'approccio two-steps è stata percorsa un'altra strada, ovvero si è cercato di ottenere una mesh che comportasse un tempo di calcolo comparabile a quello del caso appena menzionato pari a circa 9 ore. Dopo vari tentativi che sono riassunti in Tabella 4.2 si è trovato che 15 milioni di elementi totali fossero quelli necessari:

Prove (tentativi di mesh per avere un tempo di calcolo stimato di 9 h circa)	Numero elementi totali	Tempo stimato [h]
1° prova	~23e6	~219
2° prova	~19e6	~100
3° prova	~15e6	~9

Tabella 4.2 Tempi di calcolo varie mesh

Per la stima del tempo ci si è riferiti ad un numero di 800 iterazioni, che mediamente sono quelle minime necessarie per garantire la convergenza dei residui; il tempo stimato è indicato da Fluent all'inizio del calcolo, come possiamo vedere in Figura 4.4.

```

Console
1 1.0000e+00 4.3450e-02 2.0267e-02 5.8479e-02 3.9875e-06 3.9225e-01 3.8029e-01 2.2295e-01 0.0000e+00 166:46:39 999
reversed flow in 246 faces on pressure-outlet 11.
2 1.0000e+00 7.6084e-02 9.7315e-03 1.1162e-01 4.5794e-02 3.8819e+02 2.1309e+01 1.7548e-02 5.4713e+02 190:50:23 998
reversed flow in 1610 faces on pressure-outlet 11.
3 3.4151e-01 3.0461e-01 4.0858e-02 9.1219e-02 1.1687e-02 7.1367e-01 8.1153e-01 4.3275e-02 3.4440e-01 219:35:41 997
Done.
Calculation complete.

```

Figura 4.4 Tempo di calcolo con mesh da 23 milioni di elementi

Dunque riassumendo con lo schema rappresentato in Figura 4.5 abbiamo questa situazione:

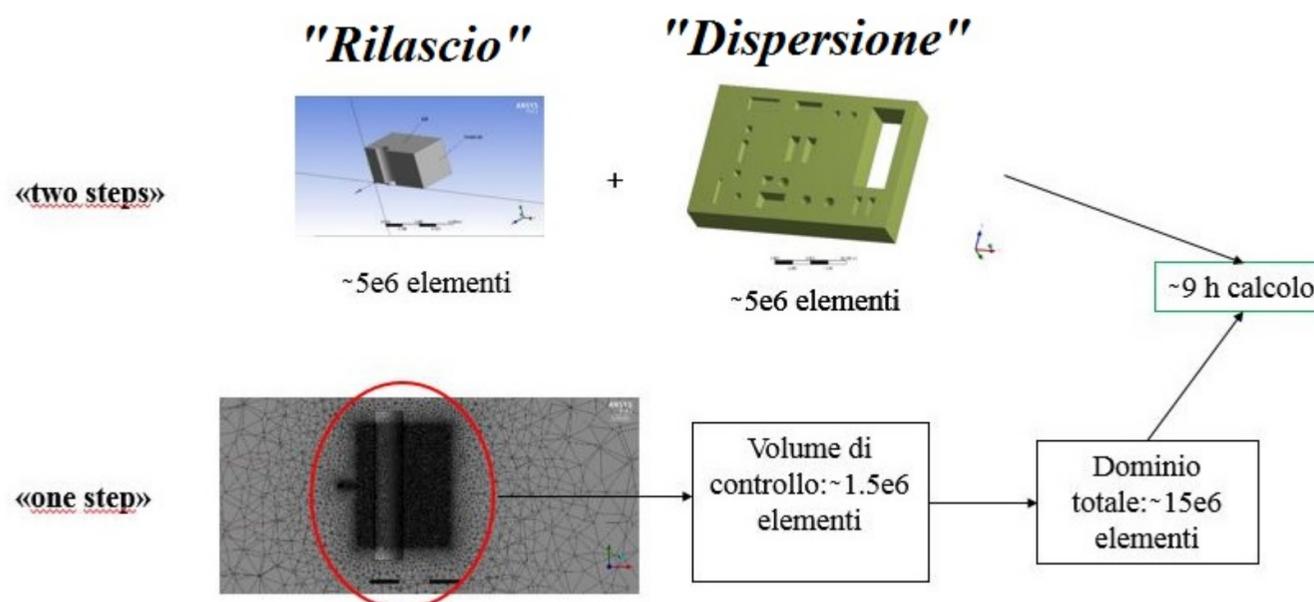


Figura 4.5 Scelte di mesh e tempi di calcolo

Sfortunatamente la conseguenza di questa scelta è che non si potrà fare un confronto quantitativo sui risultati dei due approcci, poiché la finezza delle mesh non è comparabile, per cui si farà esclusivamente un paragone qualitativo. Inoltre nel Capitolo 5 saranno discussi anche i punti dell'elenco presente in "4.2 Punto di partenza e criticità".

4.3 Impostazioni e caratteristiche della simulazione

Le caratteristiche generali della simulazione saranno analoghe a quelle delle simulazioni effettuate nel Capitolo 2. La piattaforma in questione è la medesima, per cui le sue dimensioni, le sue caratteristiche di pavimentazione, la dimensione e la posizione degli ostacoli saranno identici. Anche le condizioni di vento cui è sottoposta rimarranno inalterate per cui ci sarà sempre una velocità del vento di 6 m/s da nordovest con direzione a 45 gradi. Il rilascio considerato sarà a 10 bar, la dimensione del foro rimarrà 1 cm e la sua posizione sarà nelle coordinate -12.23, 1.5, 7 m nel riferimento della piattaforma, ovvero il punto di rilascio sarà lo stesso del caso precedente. Il primo ostacolo sarà anche in questo caso cilindrico di diametro 10 cm posto a 10 cm di distanza in maniera coassiale al getto. Nel prossimo paragrafo vedremo nel dettaglio tutte le varie impostazioni.

4.3.1 Modello CAD 3D

Il primo elemento da analizzare è sicuramente l'ugello; le dimensioni di quest'ultimo sono state definite in un precedente lavoro [11], e le possiamo visualizzare in Figura 4.6 espresse in cm.

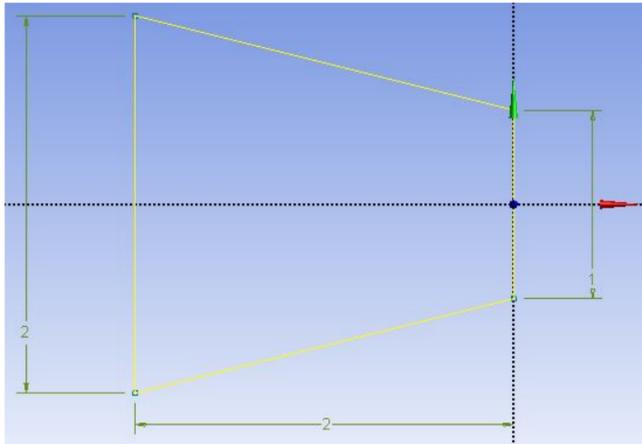


Figura 4.6 Quote ugello

In invece si può vedere in Figura 4.7 in giallo come appare l'ugello in 3D, ottenuto da una rivoluzione a 180 gradi intorno all'asse longitudinale dello sketch in Figura 4.6.

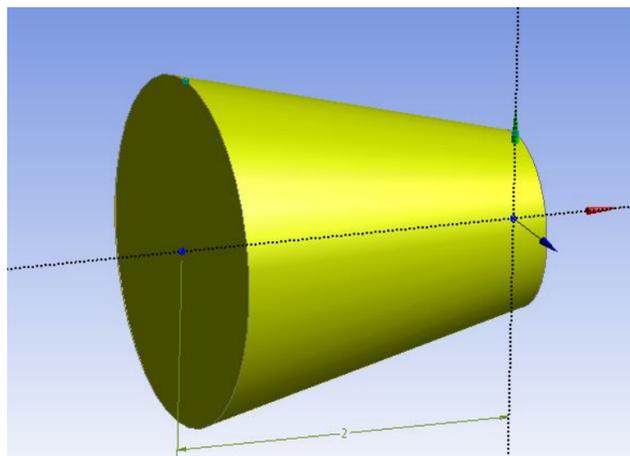


Figura 4.7 CAD 3D ugello

Un altro componente importante del CAD è il “volume di controllo” visibile in Figura 4.8 sul quale viene effettuato l'infittimento della mesh.

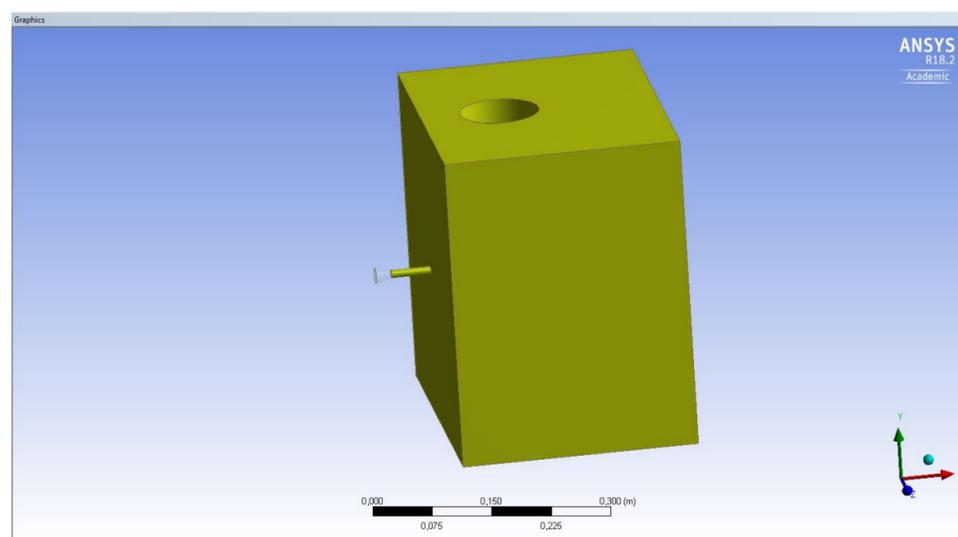


Figura 4.8 Volume di controllo

Come si può vedere questo volume inizia subito a valle dell'ugello, ha inizialmente forma cilindrica poiché il getto appena uscito sarà molto compatto e sviluppato soprattutto longitudinalmente, e successivamente forma parallelepipedica poiché il getto a contatto con l'ostacolo si “aprirà” in maniera consistente.

Possiamo vedere in Figura 4.9 come questi due elementi sono posizionati all'interno della piattaforma; la scelta della posizione dell'ugello è stata effettuata in modo tale da ottenere lo stesso punto di rilascio dei casi del Capitolo 2:

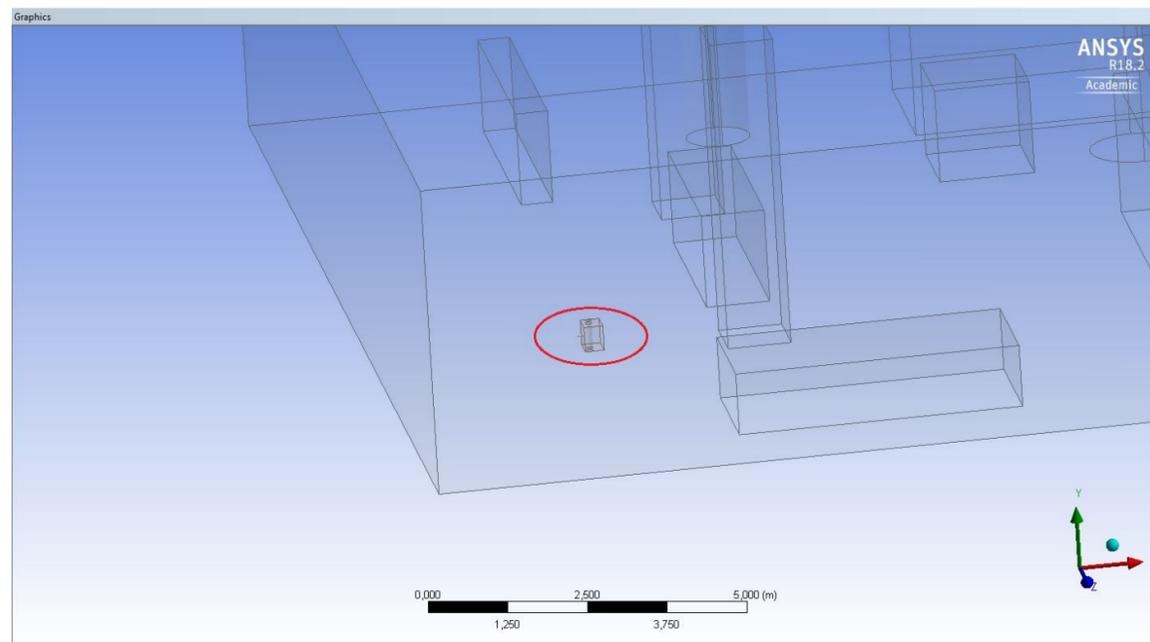


Figura 4.9 CAD volume di controllo in piattaforma

Per il CAD della piattaforma si può fare riferimento alla Figura 2.32.

4.3.2 Mesh

Il settaggio della mesh ha tenuto molto in considerazione quella già usata nel Capitolo 2, infatti le novità principali riguardano più che altro la zona subito a valle del foro, dove è stato introdotto il volume di controllo (zona corrispondente alla source box nel caso del Capitolo 2); in tutto il resto del dominio invece molti parametri di mesh sono stati lasciati invariati. Il motivo per cui si sono sfruttate molte impostazioni della precedente mesh risiede nel fatto che si tratta in ogni caso di simulare lo stesso fenomeno fisico, ovvero un rilascio di gas (metano anche in questo caso) alla stessa pressione e con stesse condizioni al contorno sulla piattaforma; per cui aldilà della prima zona in cui vi è il volume di controllo (e in cui si avrà efflusso sonico e comprimibile) ci si aspetta che nelle altre zone, che possiamo definire “*lontane*”, accadano cose analoghe. Per zone *lontane* si intende quella porzione di piattaforma in cui il flusso sarà di tipo subsonico e incomprimibile; poiché la mesh precedente della piattaforma ha risposto bene a tale tipo di fenomeno si è scelto di non modificare alcuni parametri come:

- “*Inflation layers*” sulle pareti degli ostacoli (2.4.3 Caratteristiche generali delle simulazioni);
- “*Face sizing*” sulle facce degli ostacoli (2.4.3 Caratteristiche generali delle simulazioni).

che riguardano appunto gli ostacoli della piattaforma, che si trovano in zone “*lontane*”.

Le impostazioni generali della mesh selezionate in “Sizing” sono le seguenti:

- Size Function: Uniform;
- Relevance Center: Fine;
- Transition: Slow.

La dimensione dell’elemento è di 0.4 m. La scelta di avere come funzione quella uniforme, è obbligata poiché solo con questa opzione si può sfruttare un volume di controllo per rifinire la mesh in una particolare zona; la dimensione dell’elemento che si imposta in questo menù vale per tutte le zone cui non sono stati applicati specifici “Body Sizing” e, in ogni caso, risente della presenza degli “Inflation layers” e dei “Face Sizing”.

Il metodo di mesh utilizzata è di tipo tetraedrico; la scelta è stata effettuata basandosi sulle indicazioni contenute nella “Guida di Fluent” secondo cui, per fenomeni non caratterizzati da una particolare direzionalità, è sconsigliato adottare mesh strutturate con elementi esaedrici.

Sull’ugello è stato utilizzato un particolare “Body Sizing” con una dimensione dell’elemento di $5e-4$ m, che ha portato ad avere la mesh visibile in Figura 4.10:

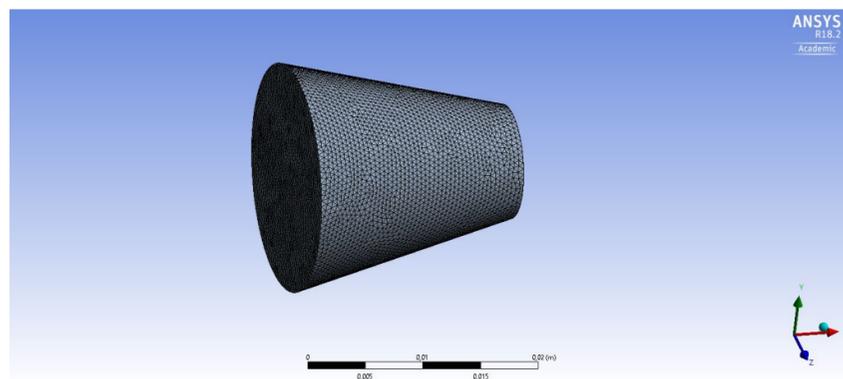


Figura 4.10 Body Sizing ugello

che considerando il volume del tronco di cono porta ad avere circa 64000 elementi all’interno dell’ugello. La dimensione dell’elemento in questo caso è stata scelta in accordo a quella usata in [11] poiché garantiva un grado di precisione adeguato nella modellazione del getto.

Un altro elemento fondamentale è il volume di controllo sul quale è stato effettuato l’infittimento della mesh; questo volume è stato usato per influenzare la finitura della mesh in quella zona, infatti è stato settato come “Body of Influence” nel menu “Body Sizing” dedicato; possiamo vedere in Figura 4.11 una sezione dello stesso.

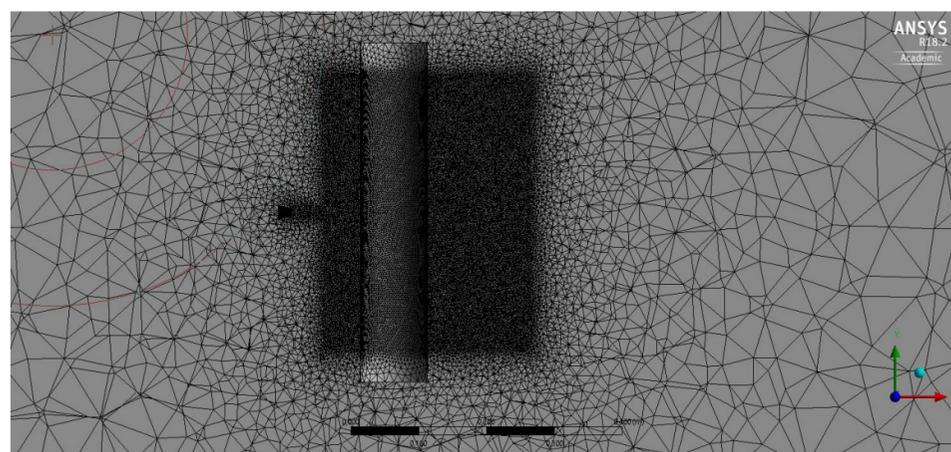


Figura 4.11 Mesh volume di controllo

Come anticipato nel paragrafo 4.2 si è cercato di ottenere un numero di elementi di circa 1.5×10^6 all'interno del volume di controllo, di conseguenza la dimensione approssimativa dell'elemento è stata stimata essere 3.4 mm. L'uso di tale espediente per infittire la mesh è molto comune e diffuso, ed è inoltre consigliato da Tolia et al. [53] nel loro sviluppo di linee guida per effettuare simulazioni CFD in ambito di sicurezza in caso di rilascio di gas idrogeno; il suddetto articolo sarà ripreso anche più avanti per giustificare altre scelte.

In Figura 4.12 si può vedere come appare la mesh complessiva.

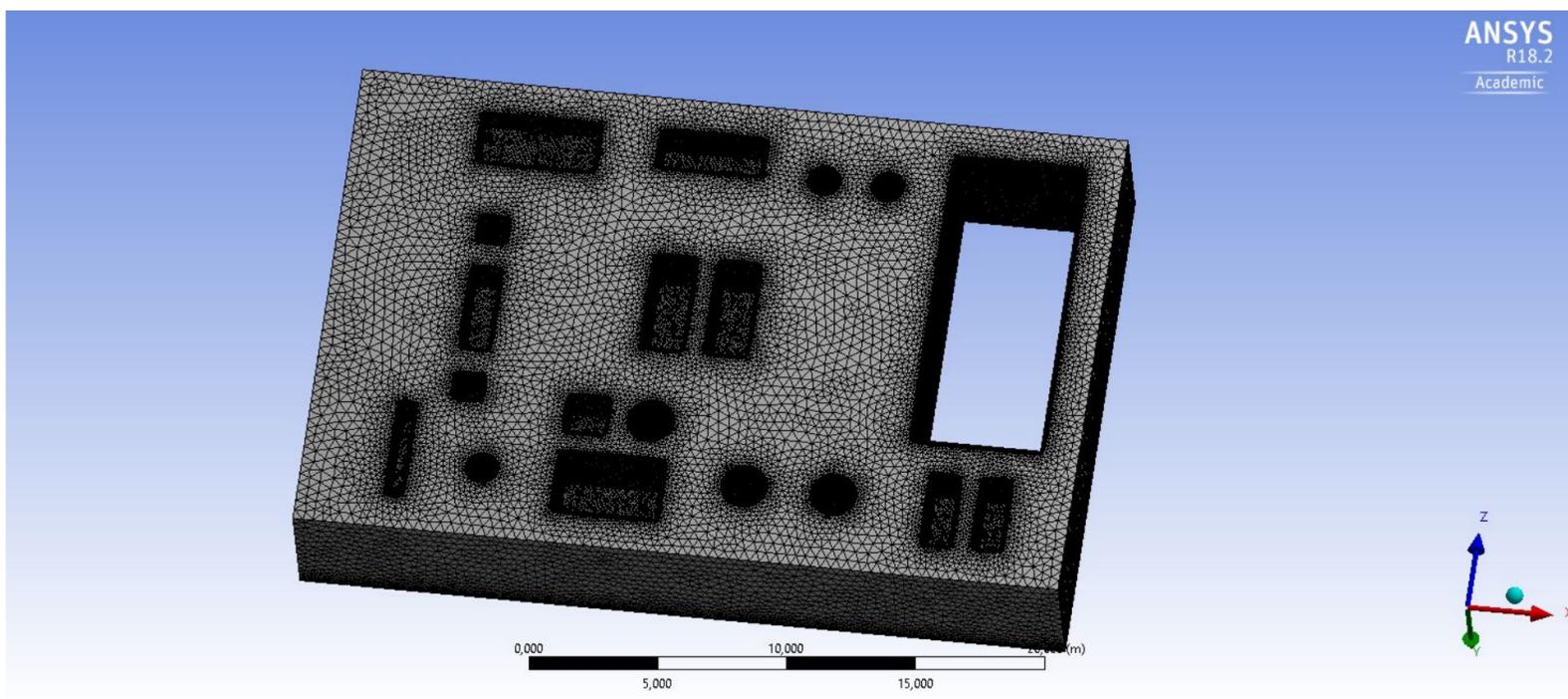


Figura 4.12 Mesh piattaforma simulazione "one-step"

Un'ultima osservazione da fare sulla mesh riguarda due parametri di qualità: "skewness" (Figura 4.13) e "orthogonal quality" (Figura 4.14) (che sono stati già definiti nel paragrafo "2.4.3 Caratteristiche generali delle simulazioni"); tutti e due rientrano in valori accettabili avendo il primo un valor medio di 0.2 mentre il secondo di 0.8 circa:

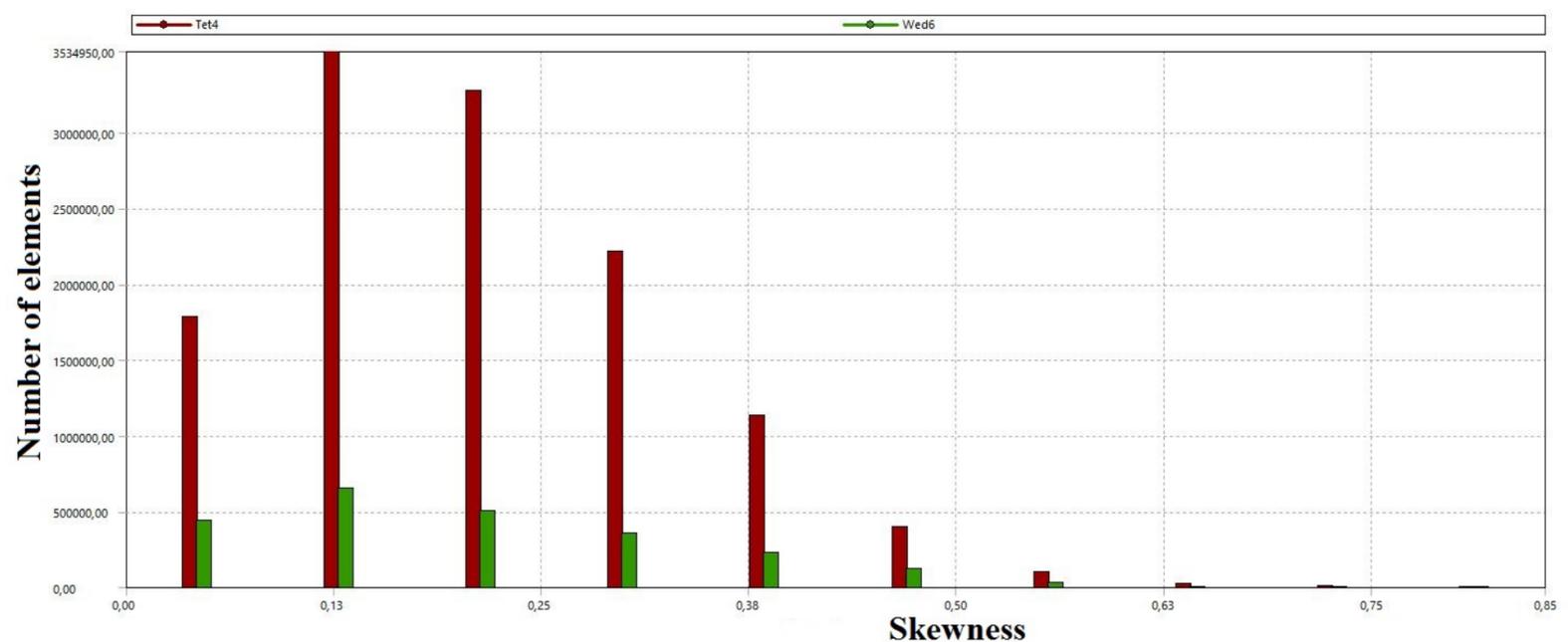


Figura 4.13 Skewness mesh simulazione one-step

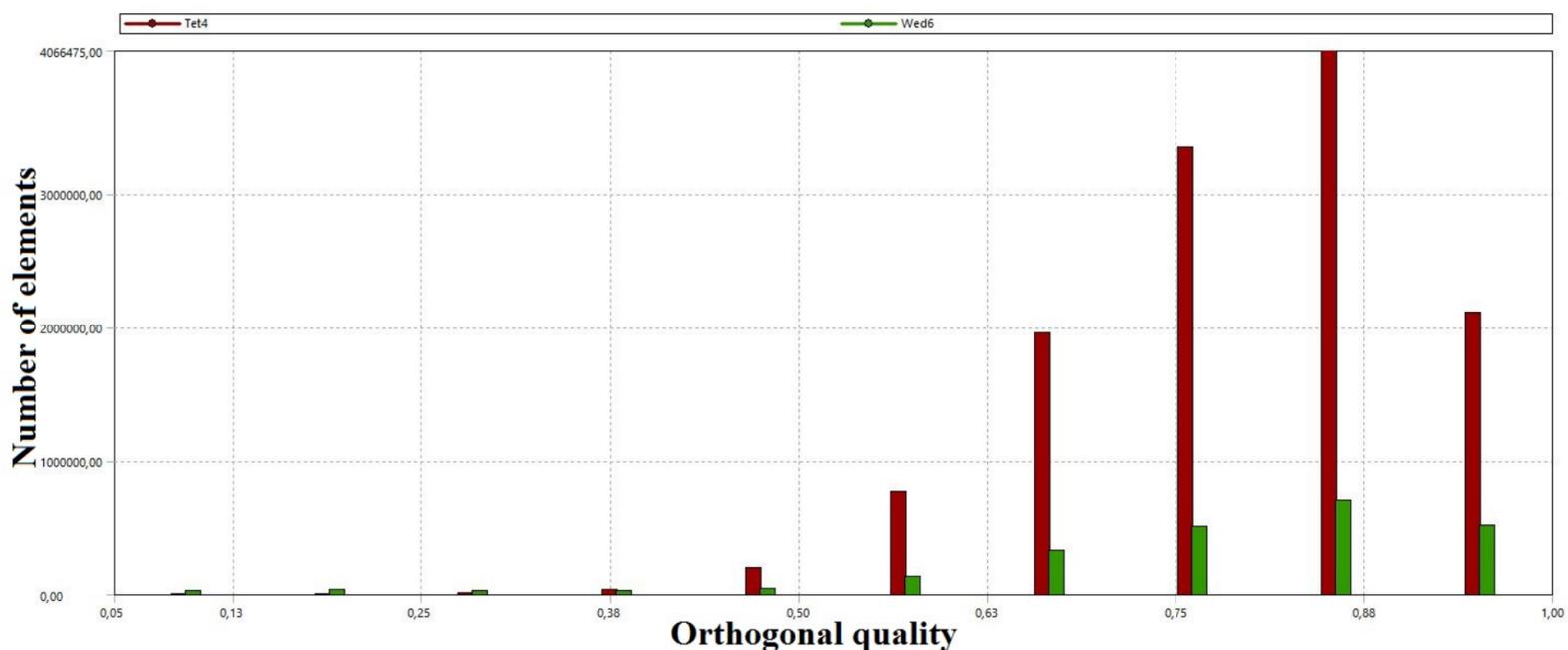


Figura 4.14 Orthogonal quality mesh simulazione one-step

4.3.3 “Setup” dei modelli di risoluzione

Il “Setup” è stato effettuato facendo tesoro delle conoscenze acquisite dagli studi sui rilasci [11] e sulla dispersione [12]. Sono stati considerati sia gli effetti di comprimibilità che di galleggiamento; ovviamente i primi saranno più importanti nel primo metro circa del rilascio nel quale data l’alta velocità (circa 800 m/s) domina l’inerzia, mentre i secondi diventeranno fondamentali nella fase di successiva dispersione della nube. In ogni caso nel settare i metodi di risoluzione si è cercato di settare i parametri e di scegliere i modelli in modo da ottenere un giusto *trade-off* tra i vari fenomeni da modellizzare.

Innanzitutto si può affermare che ci si trova in presenza di un fenomeno turbolento in quanto il numero di Reynolds in questione vale circa $5e5$, ben oltre il valore limite di $2.5e5$ che sancisce il passaggio da laminare a turbolento; ciò avrà effetto sui modelli scelti.

Sono stati considerati gli effetti di gravità, fondamentali nel momento in cui la velocità arriva a regime subsonico e le forze d’inerzia diventano trascurabili, per cui in “*General*” è stata spuntata la voce “*Gravity*” impostando un valore di accelerazione di gravità sull’asse y di -9.81 m/s^2 ; la simulazione è stata effettuata in Steady-State, per cui la voce relativa è stata spuntata.

Nel menù “*Models*” sono stati settati i seguenti parametri:

- Energy(On): equazione dell’energia attivata, per risolvere anche la temperatura, fondamentale in quanto sarà utilizzata l’equazione dei gas ideali.
- Viscous(SST k- ω): modello di turbolenza SST k- ω , che oltre ad essere consigliato nella Guida di Fluent in quanto indicato come appropriato per la maggior parte dei casi di studio industriali, è anche stato validato in molti studi sui getti transonici, come in [54] in cui è stato dimostrato che con un rilascio di CO_2 ad alta pressione riesce a modellizzare meglio degli altri modelli sia la struttura del getto a livello microscopico che il campo di velocità medio. Un’altra importante caratteristica è legata alla sua capacità di risolvere bene la separazione del flusso che si viene a creare quando il getto incontra un ostacolo [55], cosa che accade nel caso analizzato, dati numerosi ostacoli presenti in piattaforma.
- Species(Species Transport): il trasporto delle specie è stato attivato selezionando la miscela aria-metano (methane-air) e selezionando come modello quello dei gas ideali (“*ideal gas law*”). La scelta di modellizzare il gas come ideale è dovuta al fatto che si tratta di un fluido comprimibile

e dunque si vogliono cogliere gli effetti annessi, molto rilevanti soprattutto nei primi centimetri. Come suggerito in [53], quando si ha pressione atmosferica nell'ambiente circostante, tale modello di gas risponde bene.

Il passo successivo è quello di definire le **condizioni al contorno**; per quanto riguarda quelle relative alla **piattaforma** sono identiche a quelle usate nel Capitolo 2, ma per chiarezza saranno qui riassunte:

- “*Velocity inlet*” sulla faccia Nord-Ovest della piattaforma con una velocità di 6 m/s e un'inclinazione di 45° rispetto alla direzione normale alle facce. Per capire meglio le condizioni di vento fare riferimento a figura vento, mentre per visualizzare le facce in questione vedere in Figura 2.39.
- “*Pressure outlet*” sulle facce esposte a Sud-Est con pressione atmosferica in quanto esposte all'ambiente esterno. In Figura 2.41 si possono vedere le facce di riferimento.

Le **condizioni al contorno** imposte sull'**ugello** sono schematizzate in Figura 4.15:

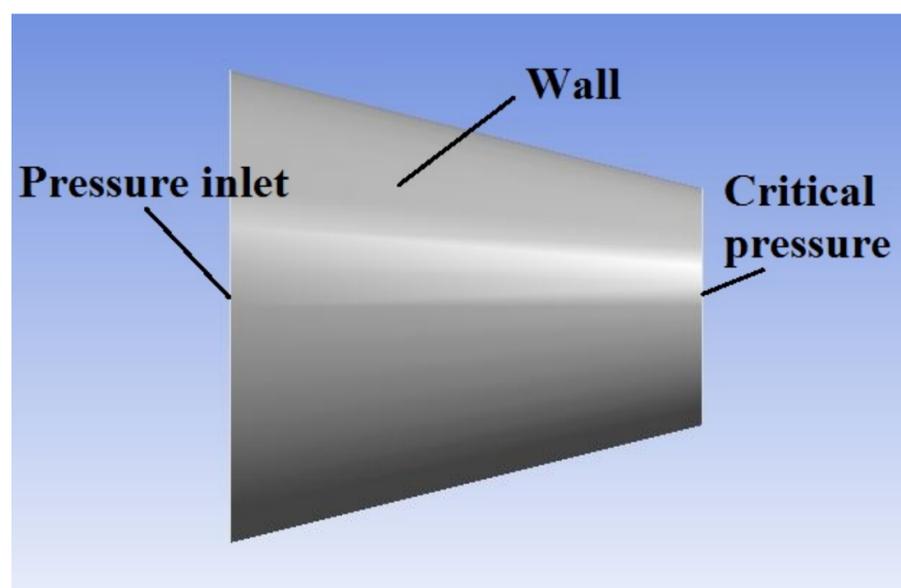


Figura 4.15 Condizioni al contorno su ugello

- “*Pressure inlet*” sulla faccia di ingresso dell'ugello con una pressione di 10 bar (10e5 Pa) e con un valore di frazione massica di CH₄ pari a 1 in quanto si ipotizza che l'efflusso sia solo di metano;
- “*Supersonic (Initial) gauge pressure*” sulla faccia d'uscita dell'ugello pari a circa metà di 10 bar, ovvero pari alla pressione critica corrispondente; serve per ottenere un flusso sonico sulla sezione di uscita dell'ugello.
- “*Wall*” sulla faccia laterale, che viene dunque impostata come parete con no-slip conditions.

Su tutte le pareti di tutti gli ostacoli presenti nel dominio e anche su pavimento inferiore e superiore della piattaforma, è stata impostata una condizione di tipo “*Wall*”. Anche per queste pareti è stata usata una *no-slip condition* dovuta al fatto che ci si trovi in presenza di un fluido viscoso, dunque la sua velocità a contatto con le pareti sarà nulla [54].

In “*Methods*” è stato poi scelto uno schema accoppiato (“*Coupled*”) per risolvere velocità e pressione, poiché indicato come il più robusto ed efficiente in casi steady-state dalla Guida di Fluent; tutti gli schemi di risoluzione sono stati poi settati al secondo ordine per tutte le equazioni, infatti in caso di flussi complessi come ad esempio quelli in cui si hanno impatti con ostacoli, usare schemi di ordine superiore è ritenuto necessario [53].

Inizialmente sono state settate almeno 800 iterazioni, ma la simulazione è stata ritenuta conclusa una volta raggiunta la convergenza dei residui (APPENDICE I).

4.4 Grid Independence

Lo studio di indipendenza della griglia è stato effettuato andando a variare unicamente la dimensione degli elementi del volume di controllo (Figura 4.11); la scelta di non modificare i parametri riguardanti le altre zone si può spiegare in questo modo:

- Ugello: è stato ritenuto che la dimensione degli elementi di questo componente fosse già ottimizzata per modellizzare al meglio il fenomeno del rilascio, poiché già studiato in un precedente lavoro [11]; in quel caso infatti è stato studiato un caso di rilascio del tutto analogo, in un dominio ridotto (source box), ed è stato effettuato uno studio di *grid independence* del quale ci si è avvalsi in questo lavoro.
- Resto della piattaforma: anche in questo caso ci si è avvalsi del lavoro di *grid independence* di un lavoro precedente [12], nel quale veniva simulata la dispersione del gas in maniera del tutto analoga a quella che si ha nel presente caso. Si presume che la mesh lontano dal punto di rilascio (fuori dal volume di controllo) si trovi nelle medesime condizioni, per cui si sono tenuti gli stessi *Inflation layers* e *Face Sizing*.

La “novità” in questo lavoro è rappresentata dal volume di controllo, e dunque si è cercato di ottimizzare questa regione andando a modificare il *sizing* degli elementi al suo interno, che comunque ha una certa influenza anche sulle zone circostanti della mesh. In Tabella 4.3 sono elencati i numeri di elementi per ogni griglia di calcolo.

Mesh 1	4e6
Mesh 2	6e6
Mesh 3	9e6
Mesh 4	12e6
Mesh 5	15e6

Tabella 4.3 Numero di elementi per diverse mesh

Per effettuare lo studio si è scelto di monitorare l’effetto dell’infittimento nel volume di controllo sia su parametro integrale che su parametri locali, mediati su un piano, la cui sezione è visibile in rosso in Figura 4.16, appositamente scelto all’interno dello stesso e che chiameremo “piano 1”.

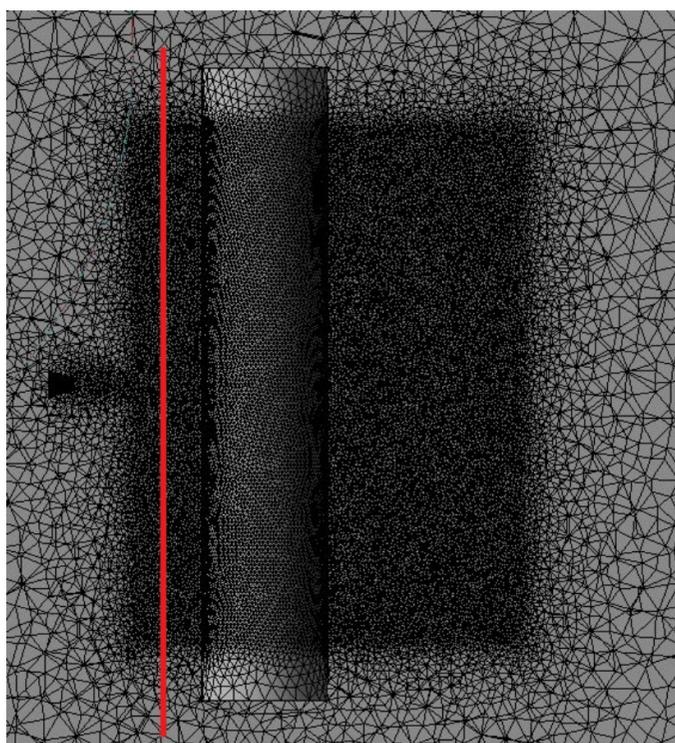


Figura 4.16 Piano1 per grid independence

In Figura 4.16 si può vedere in rosso una sezione del suddetto piano, il quale ha dimensioni 1×1 m, ed il cui centro è allineato all'asse dell'ugello.

I valori scelti per fare l'analisi:

- Volume totale di CH_4 rilasciato;
- Velocità media sul piano 1;
- Frazione massica media sul piano 1.

Sono stati ritenuti i più significativi in quanto trattandosi di un rilascio di gas, in cui si ha trasporto delle specie, a livello globale è interessante capire come varia la quantità totale di metano rilasciata, ed a livello locale il campo di velocità ed il trasporto del metano quando ancora non risentono della presenza del vento che investe la piattaforma.

L'impossibilità di avere un valore analitico della soluzione per fare un confronto con i valori calcolati tramite CFD ha spinto alla ricerca di un metodo alternativo per effettuare lo studio di convergenza; si è scelto di calcolare un valore più "esatto" possibile tramite l'extrapolazione di Richardson [43], la quale, a partire da valori con una precisione di un certo ordine p , permette di calcolare un valore con precisione di ordine almeno $p+1$. In formula il metodo si esplica in questo modo:

$$\varphi = \varphi_h + \epsilon_h$$

$$\epsilon_h = \frac{\varphi_h + \varphi_{2h}}{2^p + 1}$$

$$p = \frac{\log\left(\frac{\varphi_{2h} - \varphi_{4h}}{\varphi_h - \varphi_{2h}}\right)}{\log 2}$$

dove φ è la grandezza valutata, h la dimensione dell'elemento più piccola che è stata usata, ed ϵ l'errore associato al valore più accurato.

In questo caso la griglia col maggior numero di elemento viene associata ad h , in quanto presente la dimensione dell'elemento più piccola, e di conseguenza tutte le altre.

Nel Grafico 4.1 si può vedere come varia il volume totale di gas rilasciato in funzione del numero di elementi delle varie mesh. Possiamo notare che l'andamento non è monotono, ma a partire dalla seconda mesh in poi il valore calcolato con la CFD tende all'estrapolazione numerica.

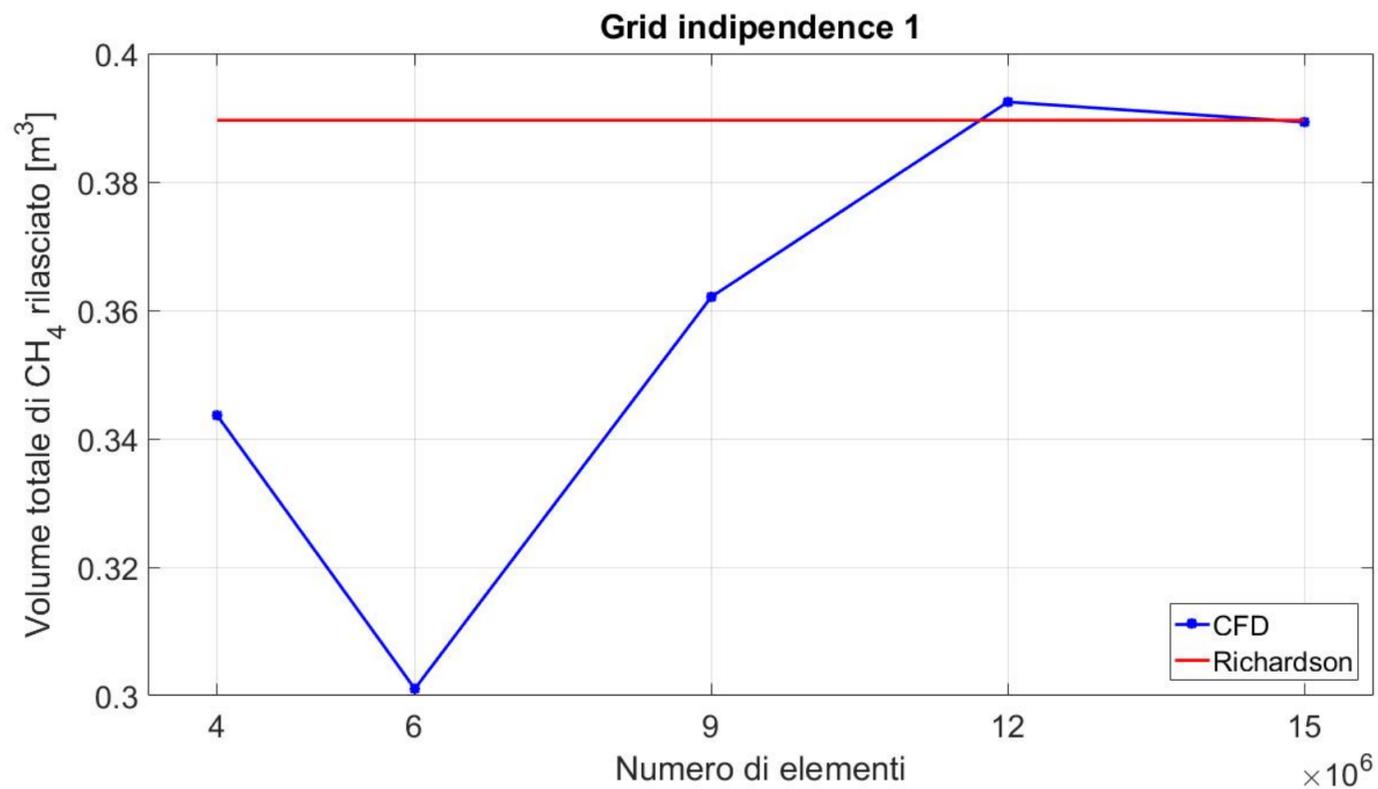


Grafico 4.1 Andamento del volume totale di metano rilasciato in funzione del numero di elementi delle diverse mesh, rapportato al valore ottenuto con l'estrapolazione di Richardson.

Nel Grafico 4.2 possiamo invece vedere come varia l'errore relativo associato al volume, calcolato rispetto al valore più esatto ovvero l'estrapolazione.

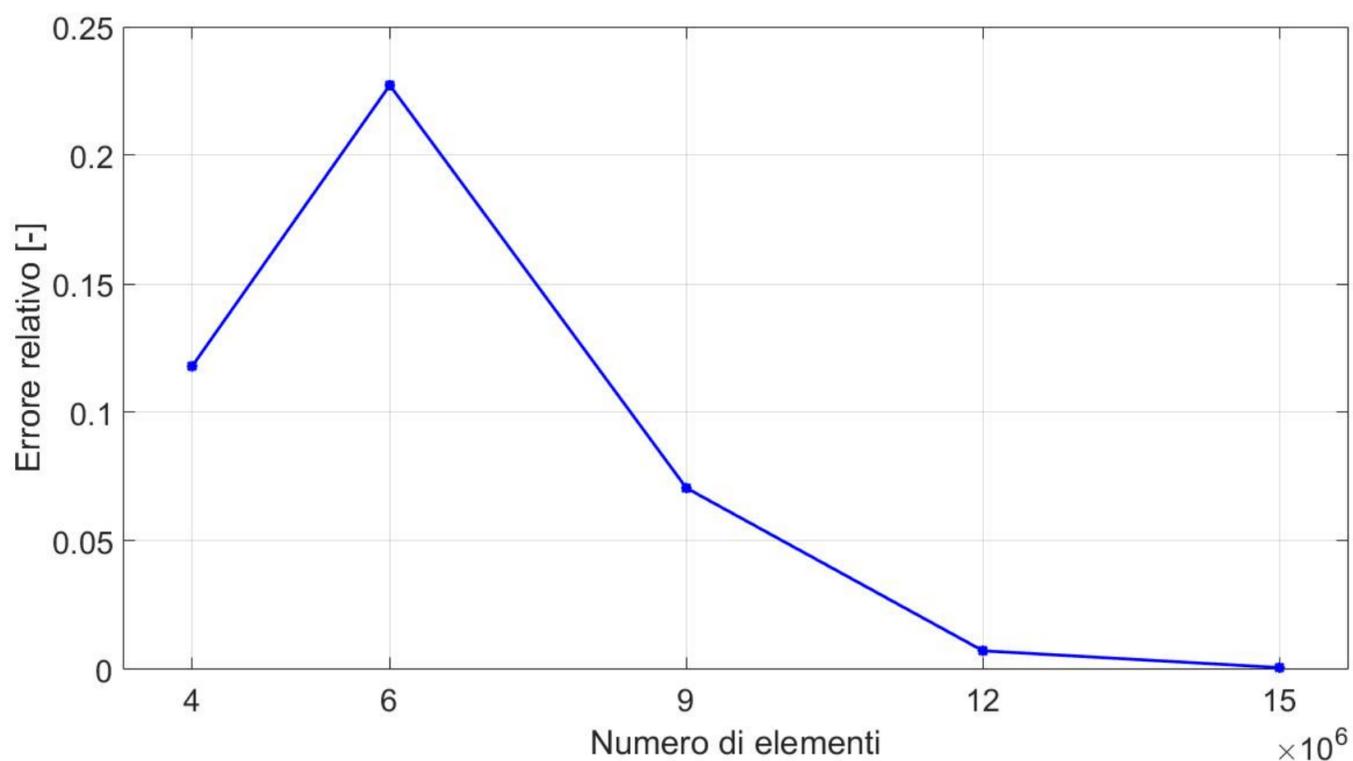


Grafico 4.2 Andamento dell'errore relativo tra volume totale di metano rilasciato calcolato tramite CFD ed estrapolazione di Richardson, in funzione del numero di elementi delle diverse mesh.

Facendo invece riferimento ai valori medi calcolati sul piano 1, si è ottenuto l'andamento rappresentato nel Grafico 4.3; anche qui non si ha monotonia, ma allo stesso modo dopo la seconda mesh il valore ottenuto con CFD converge al valore estrapolato.

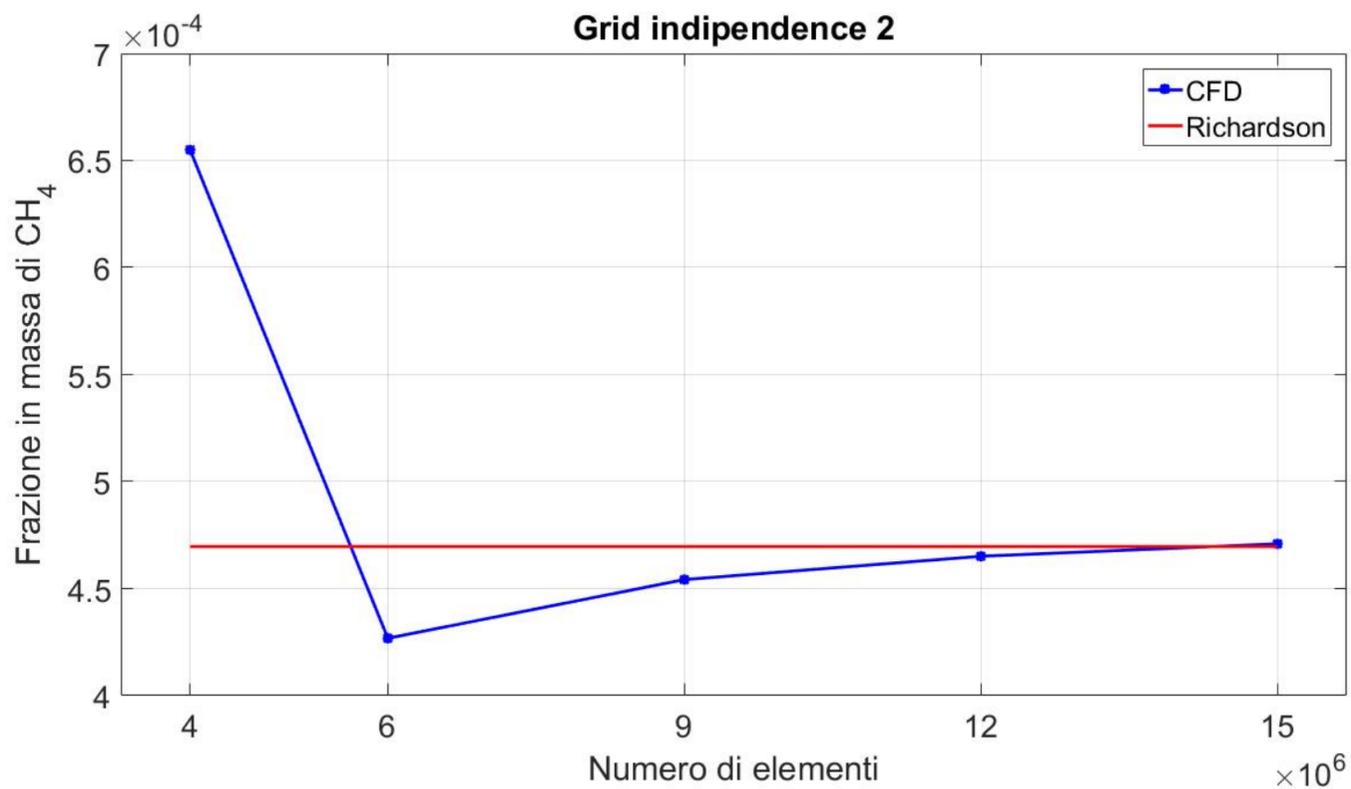


Grafico 4.3 Andamento del valor medio di frazione in massa di CH_4 sul piano 1 in funzione del numero di elementi delle diverse mesh, rapportato al valore ottenuto con l'estrapolazione di Richardson.

L'annesso errore relativo è rappresentato nel Grafico 4.4.

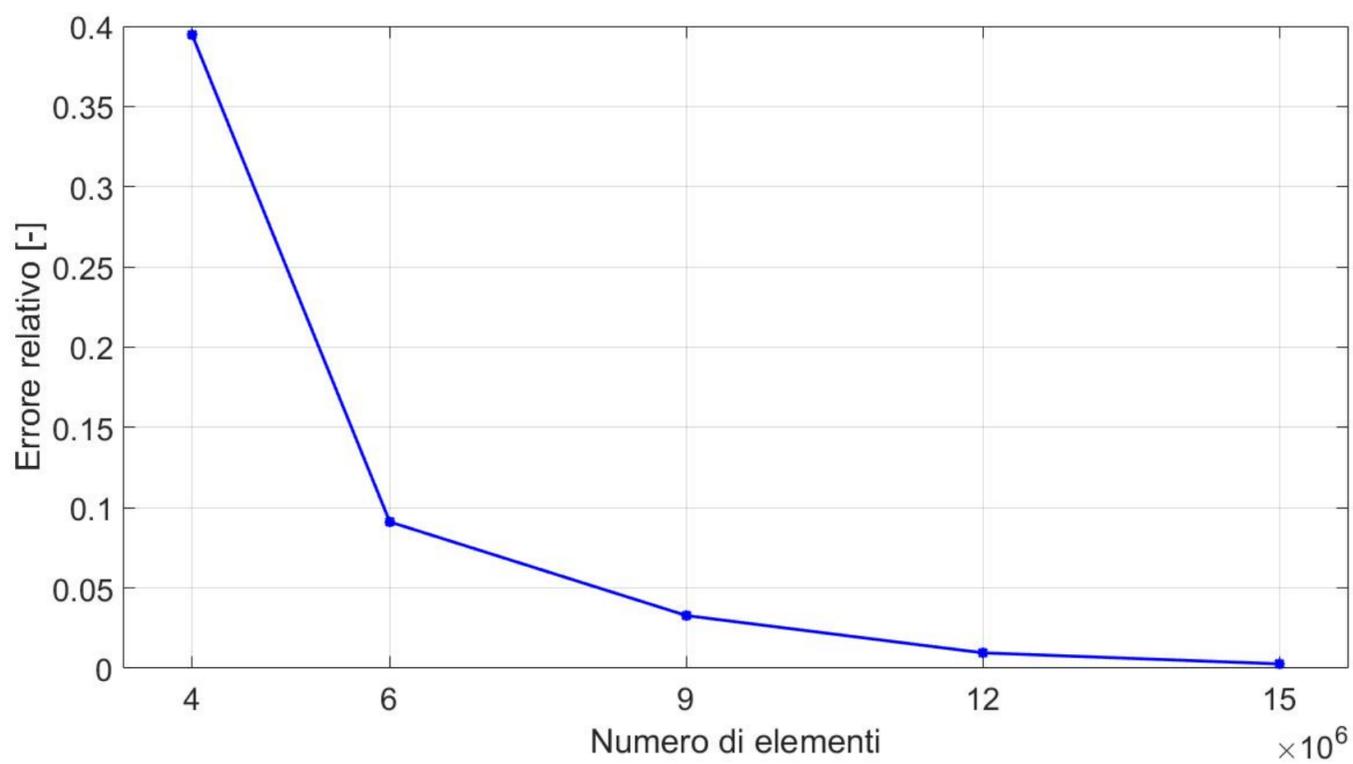


Grafico 4.4 Andamento dell'errore relativo tra valor medio di frazione in massa di CH_4 sul piano 1 calcolato tramite CFD ed estrapolazione di Richardson, in funzione del numero di elementi delle diverse mesh.

Infine nel Grafico 4.5 si ha l'andamento della velocità media sul piano 1; questa volta il valore cresce in maniera monotona e tende all'estrapolazione.

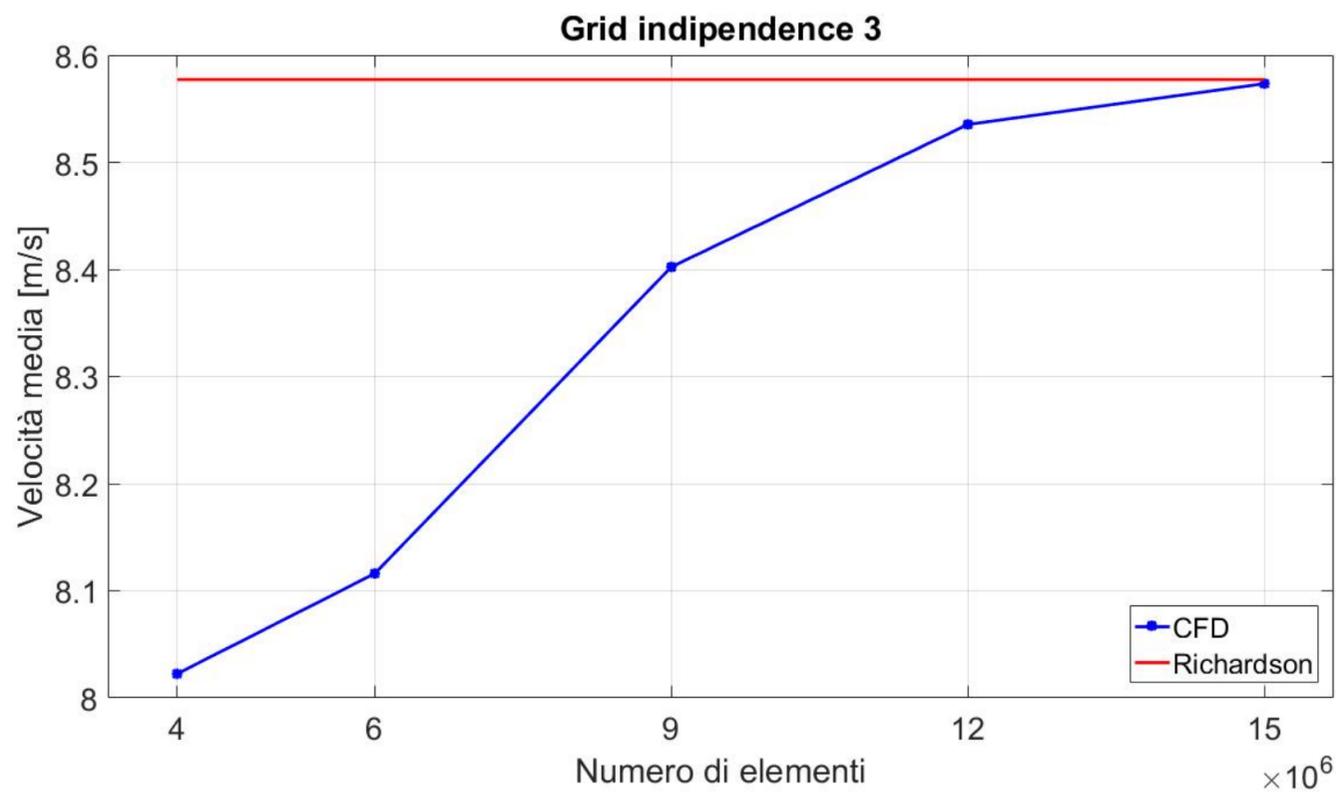


Grafico 4.5 Andamento della velocità media sul piano 1 in funzione del numero di elementi delle diverse mesh, rapportato al valore ottenuto con l'estrapolazione di Richardson

L'errore relativo annesso è rappresentato nel Grafico 4.6.

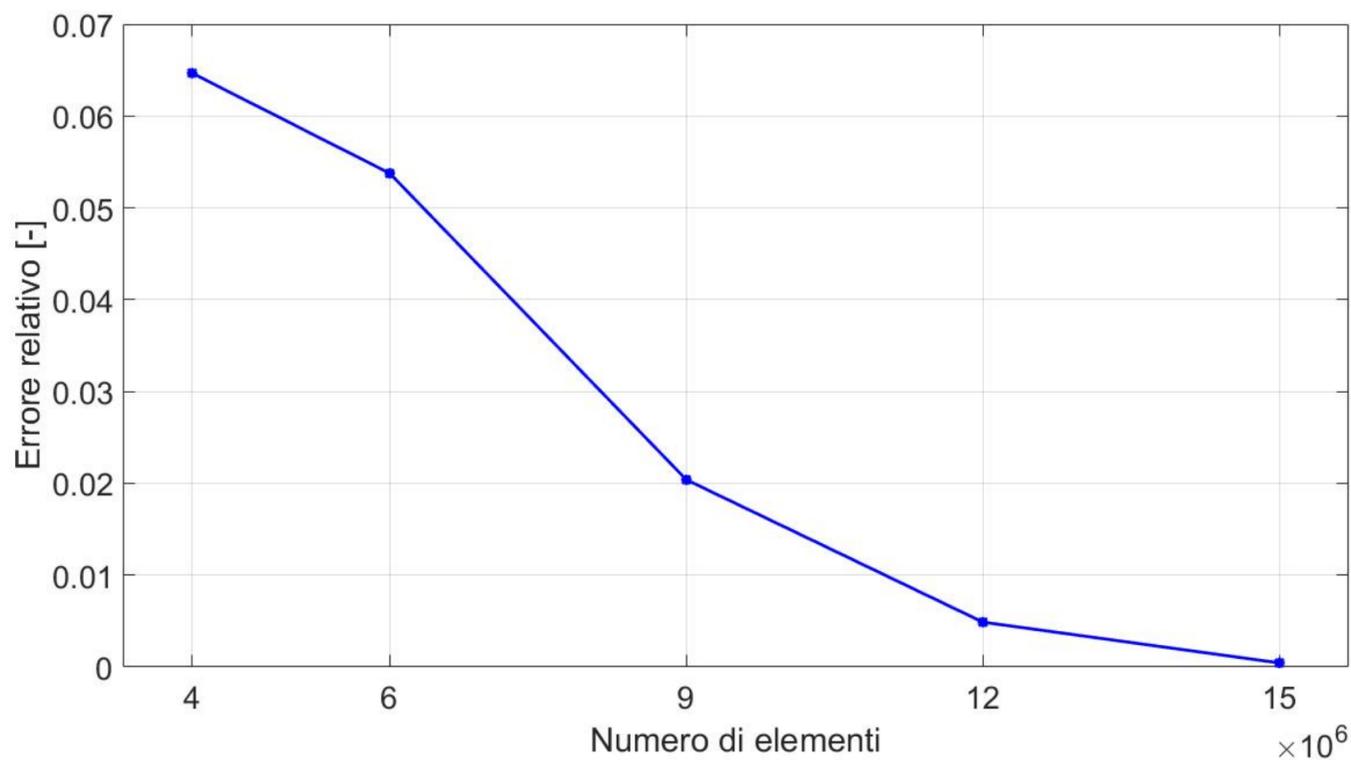


Grafico 4.6 Andamento dell'errore relativo tra velocità media sul piano 1 calcolata tramite CFD ed estrapolazione di Richardson, in funzione del numero di elementi delle diverse mesh.

Si può notare come in tutti i casi la griglia caratterizzata da 12 milioni di elementi induca un errore relativo sotto il 2 % circa, per cui si può ritenere dia risultati affidabili tanto quanto quella più rifinita.

Capitolo 5 ANALISI DEI RISULTATI E CONFRONTO “ONE-STEP” vs “TWO-STEPS”

Questo capitolo è interamente dedicato all'analisi dei risultati ottenuti nella simulazione one-step e al confronto su diversi aspetti di quest'ultima con la simulazione coupling.

Innanzitutto è utile partire dall'analisi del campo di moto, visibile in Figura 5.1, che si genera per vedere come è influenzato dalle condizioni di vento cui è sottoposta la piattaforma e per vedere come questo influenzerà la dispersione della nube di gas.

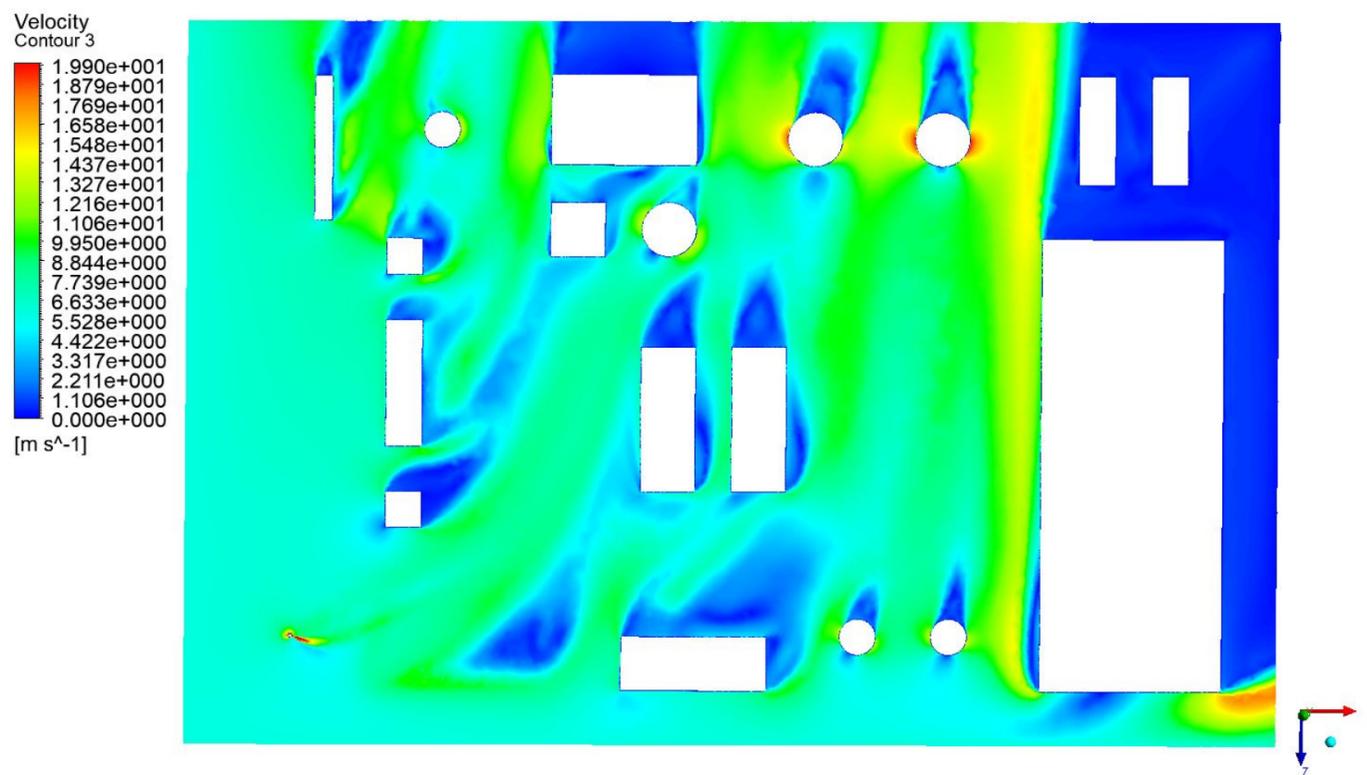


Figura 5.1 Campo di moto della simulazione one-step su piano trasversale a metà della piattaforma

Come si può vedere la direzione prevalente è concorde a quella del vento, infatti il flusso tende a percorrere la piattaforma in diagonale partendo dall'angolo Nord-Ovest (in basso a sinistra) e puntando l'angolo Sud-Est (in alto a destra); ci si aspetterebbe dunque di vedere “uscire” il flusso dalle facce a Sud ed Est, ma in realtà si può vedere come sulla faccia Sud (destra) la velocità sia pressoché nulla tranne che in una piccola porzione in basso; questo è dovuto alla presenza degli ostacoli che influenza significativamente la direzionalità del flusso; in questo caso l'ostacolo più grande posto vicino l'angolo Sud-Ovest devia consistentemente il flusso verso la faccia Est, facendo sì che la fuoriuscita maggiore si abbia da quella faccia.

La presenza degli ostacoli ha anche il ruolo di favorire la miscelazione del gas metano con l'aria; si possono notare infatti delle zone blu a valle di ogni ostacolo che rappresentano una depressione in quei punti, e delle zone rosse vicino agli ostacoli cilindrici che rappresentano un moto con alto gradiente di velocità, tutte situazioni che portano ad avere fenomeni di ricircolo e la formazione dei così detti “vortici secondari” che hanno come effetto primario quello di aumentare il miscelamento delle sostanze.

Una volta visto com'è il campo di moto generato, è più facile immaginare quale possa essere lo sviluppo della nube di CH₄ e su quali ostacoli andrà ad impattare.

In Figura 5.2 è rappresentata la frazione molare di metano.

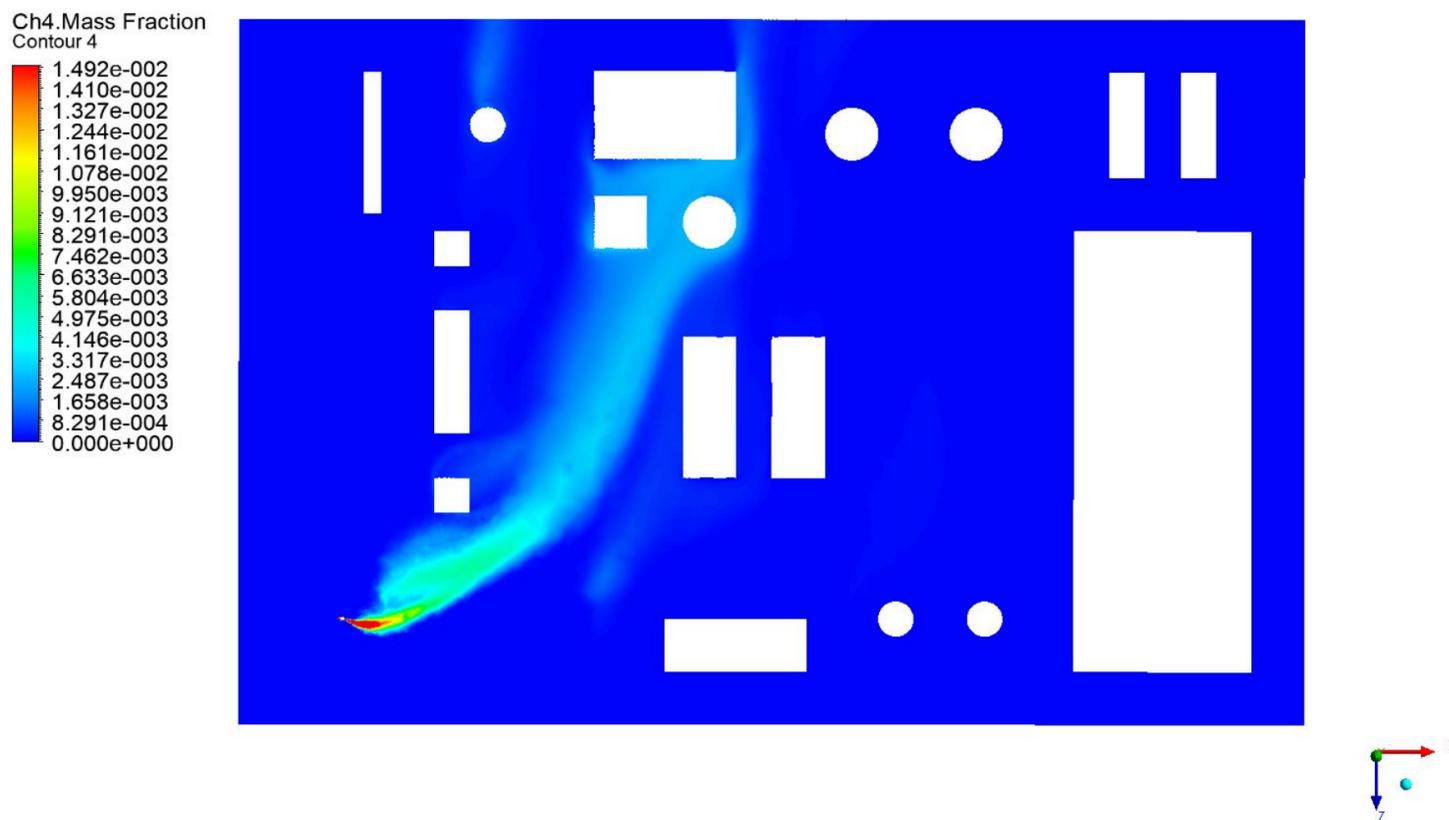


Figura 5.2 Nube di metano della simulazione one-step su piano trasversale a metà della piattaforma

Come ci si poteva aspettare il pennacchio si sviluppa in direzione concorde al campo di moto, andando ad impattare gli ostacoli più vicini alla faccia Est.

Dopo questa breve analisi macroscopica del fenomeno è interessante andare ad osservare cosa accade anche su una scala spaziale inferiore; come detto più volte il rilascio di gas in questione avviene ad una pressione molto elevata ($p_{ril} = 10$ bar), mentre l'ambiente circostante si trova a pressione atmosferica ($p_{amb} = 1$ bar); ciò porta al verificarsi della condizione di criticità dell'efflusso. Infatti il rapporto p_{amb}/p_{ril} risulta nettamente inferiore del rapporto critico R:

$$R = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$$

$$0.1 \approx \frac{p_{amb}}{p_{ril}} < \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \approx 0.5$$

Dunque la velocità di efflusso sarà sonica e il numero di Mach pari a 1; come spiegato nel paragrafo "2.1 Fisica del problema" se il numero di Mach è superiore a 0.3, gli effetti di comprimibilità sono rilevanti, per cui ci si aspetta che nella prima parte del rilascio siano visibili le onde di shock, tipiche di un getto comprimibile.

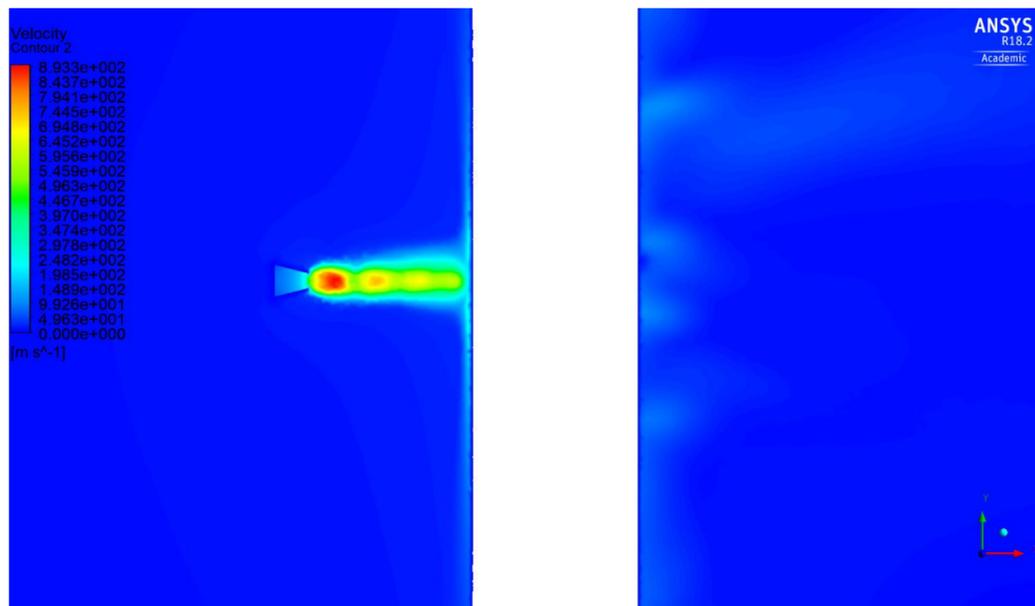


Figura 5.3 Onde di shock 1

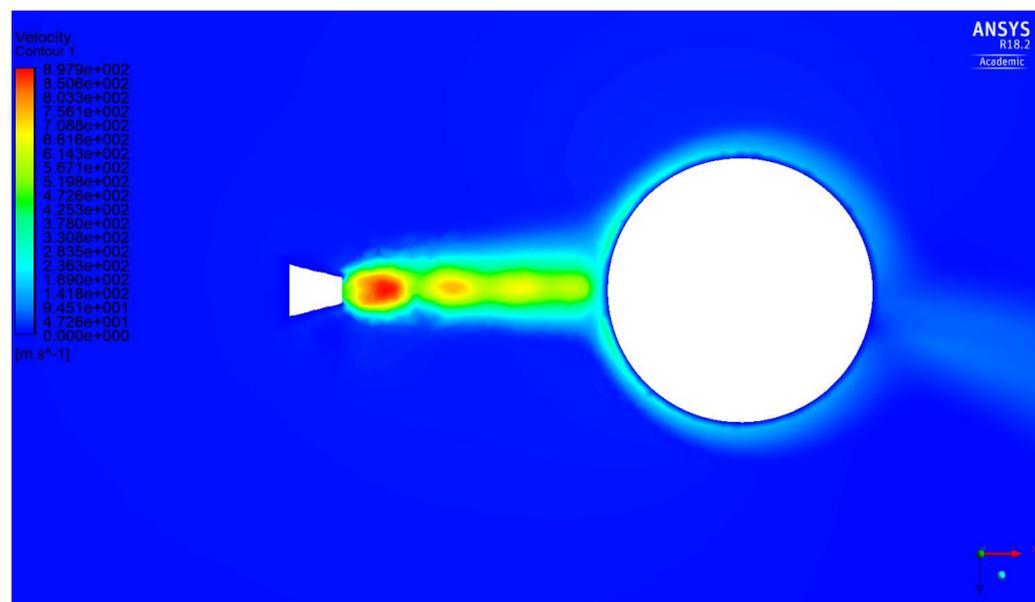


Figura 5.4 Onde di shock 2

In Figura 5.3 e Figura 5.4 possiamo vedere che effettivamente gli effetti di comprimibilità sono presenti ed influenzano la struttura del getto; la discontinuità nella velocità indica la presenza dei dischi di Mach, tipiche strutture dei getti comprimibili. Si può dire che in questo caso si è verificato ciò che ci si aspettava.

Questi risultati ci fanno capire che almeno qualitativamente il fenomeno è stato modellizzato in maniera accettabile, in quanto coerente con le aspettative derivanti dallo studio della fisica del fenomeno; un'altra questione invece riguarda la validità della soluzione a livello quantitativo.

A questo punto è utile effettuare un confronto tra approccio “two-steps” e “one-step” per capire quali siano le differenze, i vantaggi e gli svantaggi; prima però bisogna puntualizzare alcuni concetti. In primis, la simulazione presa come riferimento per l’approccio a due steps è quella di “coupling” in quanto rappresenta il caso più vicino al reale ed accurato; il confronto dei risultati sarà principalmente qualitativo poiché la raffinatezza della mesh non è paragonabile, ma si farà cenno ad un breve confronto quantitativo di massima per ragionare sugli ordini di grandezza.

Come spiegato in “4.2 Punto di partenza e criticità” non è stato possibile generare una mesh per la simulazione ad uno step, che fosse di “precisione” pari a quelle usate nel two-steps; infatti a parità di macchina usata è stato impossibile gestire una mesh così sofisticata e con tanti elementi. Dunque la prima considerazione da fare è che l’approccio a two-steps ha permesso di simulare la parte iniziale del rilascio con una mesh più rifinita: uno dei vantaggi di separare in due fasi il fenomeno è quello di

poter sfruttare la simmetria nel primo step, che, infatti, in questo caso viene simulato solo in un quarto della source box; è stato dunque possibile generare elementi più piccoli.

È inoltre importante osservare la variazione dei tempi di calcolo; sempre nel paragrafo 4.2 si è visto che, per ottenere dei tempi di calcolo comparabili, è stato necessario adottare una mesh molto “blanda” nella prima zona del rilascio, dove vi sono gli effetti di comprimibilità; ciò porta a dire che il paragone tra i due approcci potrà essere fatto principalmente a livello qualitativo, mentre a livello quantitativo si potrà ragionare sugli ordini di grandezza con molta cautela poiché le quantità di sostanza rilasciata e in generale di tutte le grandezze risentono significativamente della qualità della mesh. Un altro aspetto che avvantaggia il metodo two-steps riguarda il fatto che una volta realizzata la simulazione di rilascio supersonico nella SB, la stessa può essere utilizzata per diverse simulazioni di dispersione; dunque anche in questo senso si riducono i tempi coinvolti.

Il parametro scelto per fare il confronto qualitativo è il volume di gas metano rilasciato, in Figura 5.5 e Figura 5.6. è illustrata la nube di gas nei due casi.

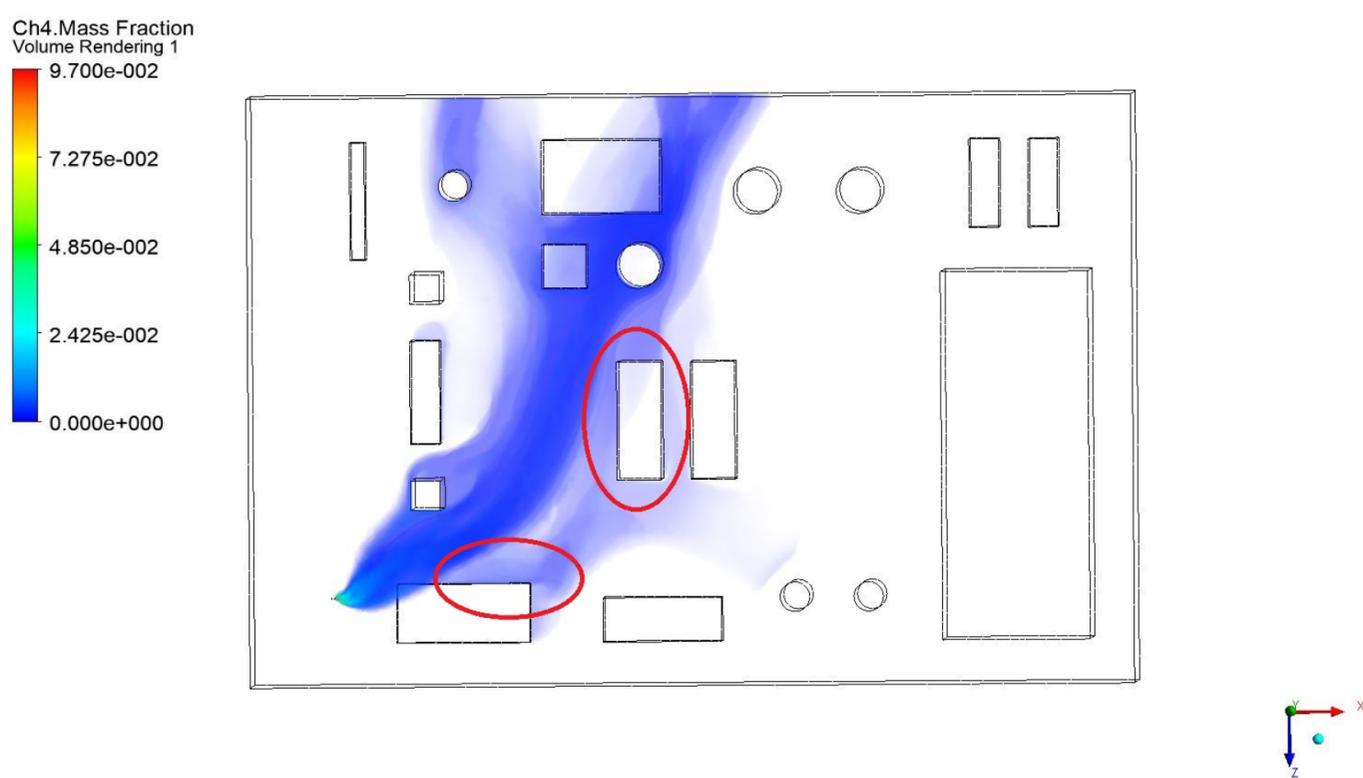


Figura 5.5 Volume totale di gas metano rilasciato nella simulazione one-step

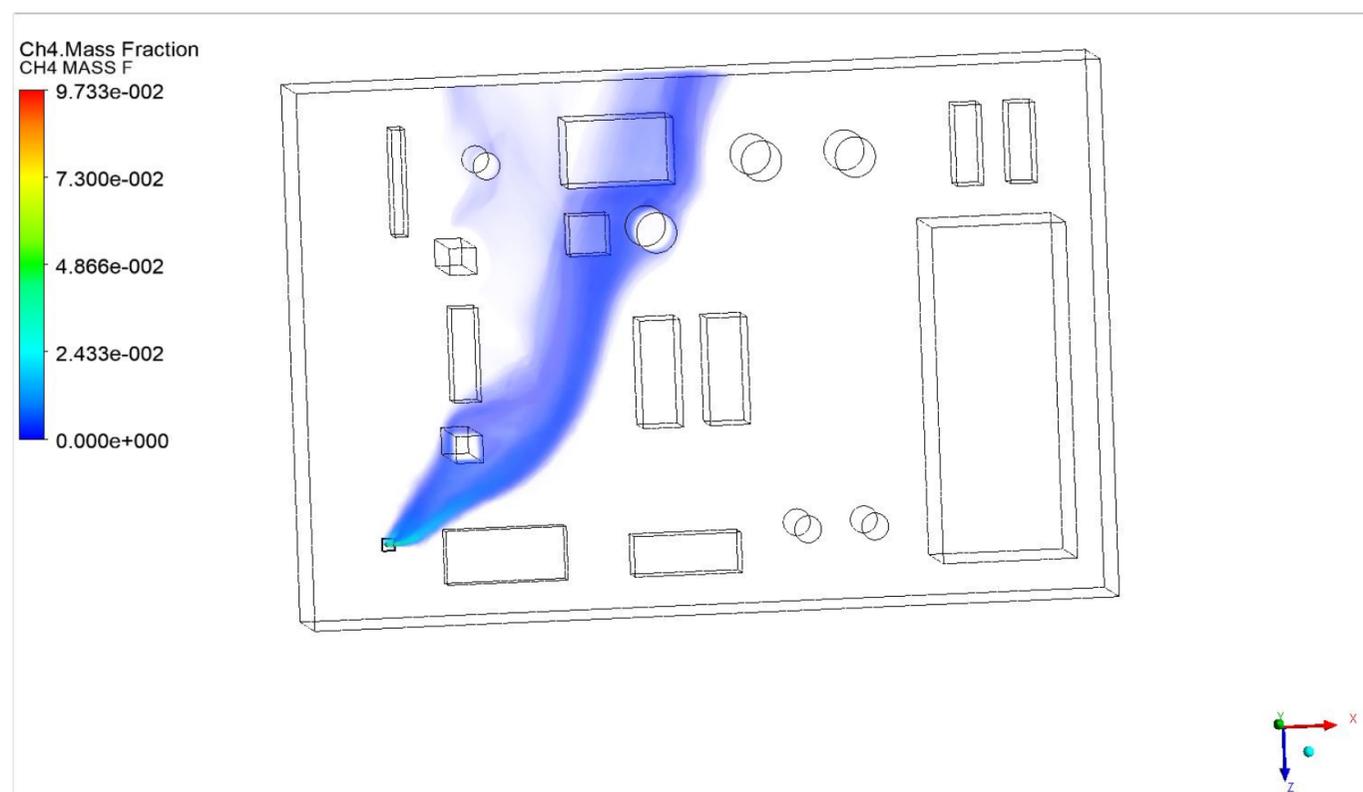


Figura 5.6 Volume totale di gas metano rilasciato nella simulazione two-steps

In Figura 5.5 si può vedere la nube di gas relativa alla simulazione one-step, mentre in Figura 5.6 quella relativa alla simulazione di coupling; da una prima analisi visiva si può vedere che le nubi hanno uno sviluppo simile, concorde con la direzione del vento e tendono a dirigersi verso la faccia Est della piattaforma.

La differenza più evidente in questo caso è sicuramente legata agli ostacoli toccati dalla nube; è molto importante capire quali oggetti vengano lambiti dal gas per fare una analisi della sicurezza e per capire dove localizzare i sistemi di monitoraggio all'interno della piattaforma; si può vedere che vi siano dei componenti che vengono coinvolti in tutti e due i casi mentre altri (cerchiati in rosso) solo nel primo caso. La differenza si spiega considerando che in quest'ultimo caso il getto appare molto più aperto e ciò può essere ricondotto alla poca raffinatezza della mesh nella prima fase del rilascio, che non riesce a modellizzare opportunamente l'effetto Coanda intorno al primo ostacolo e porta ad una leggera apertura del getto a valle del cilindro [41].

È anche interessante vedere come a livello quantitativo gli ordini di grandezza rimangano gli stessi, seppur nel caso one-step rimanga il deficit di precisione della mesh; in Tabella 5.1 possiamo vedere i valori di maggiore interesse.

Caso	Vol. tot. gas rilasciato [m³]	Vol. infiammabile. gas rilasciato [m³]	Area lambita [m²]
One-step	0.389	0.003	0.344
Two-steps	0.356	0.005	0.212

Tabella 5.1 Confronto risultati one-step vs two-steps

Si può notare come i volumi totali siano abbastanza vicini, inducendo un errore relativo inferiore al 10 %, mentre i volumi di infiammabile siano molto più distanti inducendo una differenza del 40 %. Il fatto che i primi siano simili ci fa capire che in ogni caso la massa di gas in gioco è più o meno conservata, il che è un buon risultato poiché si può dedurre che nel caso two-steps non si inducono errori di conservazione della massa nell'effettuare il coupling tra le due fasi; il volume di infiammabile, che è sicuramente il parametro più rilevante per l'analisi delle conseguenze legate ad una possibile esplosione, è invece molto sottostimato nel caso one-step e ciò ci porta a concludere che non si possa ritenere quest'ultimo un approccio conservativo.

Per concludere questo confronto in si cerca di fare il punto della situazione, presentando sinteticamente vantaggi e svantaggi dei due approcci; è necessario ricordare che il confronto è fatto considerando l'utilizzo della stessa macchina e imponendo di avere lo stesso tempo di calcolo nei due casi.

Approcci	Vantaggi	Svantaggi
One-step	1. Implementazione di una sola simulazione; ● 2. Stato dell'arte più avanzato. ●	1. Sottostima vol. infiammabile; ● 2. Inferiore rifinitura della mesh; ● 3. Difficoltà nel gestire mesh con zone a diverse densità di elementi; ● 4. Difficoltà di modellare nella stessa simulazione fenomeni fisici eterogenei. ●
Two-steps	1. Possibilità riutilizzo della simulazione della fase "rilascio" per diverse simulazioni di dispersione; ● 2. Si possono simulare fenomeni fisici differenti in simulazioni diverse; ● 3. Si può rifinire la mesh delle singole fasi in maniera da ottenere risultati più precisi. ●	1. Implementazione di 2 simulazioni per singolo evento; ● 2. Basso <i>know-how</i> ; ● 3. Difficoltà nel effettuare il "coupling" tra le due fasi. ●

Tabella 5.2 Vantaggi/Svantaggi approcci one-step e two-steps

Capitolo 6 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUFURI

L'ambito di questo lavoro è quello dell'analisi delle conseguenze relative ad un evento incidentale tipico del settore Oil&Gas: un rilascio di gas compresso infiammabile da un foro. L'approccio scelto è stato quello dell'analisi numerica tramite CFD, sfruttando il software ANSYS Fluent.

Il risultato principale ottenuto in questo lavoro è stato quello di sviluppare ed aumentare ancora di più le conoscenze sull'approccio CFD innovativo chiamato "two-steps" che trae vantaggio, in termini di tempo e risorse, dalla divisione del fenomeno in due parti: rilascio e dispersione. La ricerca di un metodo con cui si possano simulare molti scenari incidentali ottimizzando tempo e risorse nasce dalla necessità di sviluppare metodologie sempre più efficienti, affidabili e rapide per condurre analisi di rischio di tipo industriale.

Partendo da lavori precedenti sulla fase di rilascio e dispersione, è stato sviluppato un metodo per permettere di interfacciare le due fasi in maniera precisa, rapida ed efficiente; tale metodo fa uso di un software d'appoggio, Matlab, per processare i risultati ottenuti dal rilascio e renderli pronti all'uso per la fase di dispersione.

Tramite uno studio di sensitività è stata indagata la sensibilità della soluzione rispetto alla precisione con cui vengono forniti i dati dallo step 1 allo step 2; si è dimostrato che, se si estrapolano solo dei valori medi o se si usano dei profili approssimati, alcune grandezze importantissime come il volume di gas entro i limiti d'infiammabilità, potrebbero essere drasticamente e pericolosamente sottostimate; ad esempio nel caso delle simulazioni con frazione in massa di CH_4 uniforme, il volume di infiammabile viene sottostimato quasi del 100 %. Nell'effettuare la valutazione del danno associato ad un determinato evento incidentale è fondamentale evitare delle sottostime, che possono risultare molto pericolose, per questo il presente lavoro ha indagato tali aspetti arrivando alla conclusione che la scelta migliore è quella di effettuare un coupling completo tra le due fasi, estrapolando dei profili continui dalla prima ed usandoli per la seconda senza alcuna approssimazione.

L'ultimo importante tema trattato è il confronto tra approccio one-step e two-steps; la ragione per cui si è scelto di effettuare questo paragone risiede nella necessità di capire se convenga realmente perseguire la strada dell'idea innovativa di scindere in due il fenomeno totale oppure se sia un inutile artificio. È stata realizzata una simulazione che fosse del tutto analoga al coupling in modo da poter fare un confronto diretto a parità di: caso studio, potenza di calcolo disponibile e precisione della mesh. Il risultato principale che si è ottenuto è stato quello di constatare la grande difficoltà nel gestire un fenomeno così fisicamente eterogeneo nella stessa simulazione, poiché ciò richiede una mesh molto complessa con infittimenti molto densi in alcuni punti del dominio totale. È stato dunque impossibile effettuare una simulazione che garantisse la stessa precisione di mesh che si aveva nel two-steps, poiché la potenza di calcolo richiesta è risultata nettamente superiore, e i tempi coinvolti molto più lunghi e ciò porta alla prima conclusione: l'approccio one-step è più dispendioso in termini di tempo e potenza di calcolo. Dunque si è deciso di fare un confronto tra i due approcci a parità di tempo di calcolo; ciò ha comportato che nel caso one-step la mesh fosse molto meno rifinita che nel caso two-steps e questo ha avuto ovviamente un notevole impatto sulla soluzione. Quest'ultima è stata confrontata principalmente sul piano qualitativo, mentre sul piano quantitativo sono stati messi a paragone dei valori di interesse per poter ragionare sugli ordini di grandezza coinvolti nei due casi; questi ultimi sono risultati essere molto in accordo, mostrando come in entrambi i casi il volume totale fosse simile, se non che la simulazione one-step si è dimostrata poco conservativa poiché tendente a sottostimare il volume infiammabile di gas. Dall'analisi vantaggi/svantaggi dei due approcci è emerso che per il particolare caso studio di rilascio ad alta pressione di metano in una piattaforma sia più adatto un approccio two-steps, che permetta di gestire meglio l'eterogeneità dei fenomeni fisici

coinvolti e che permetta di evitare il ricalcolo della fase 1 qualora servisse analizzare un caso analogo in un dominio di dispersione differente.

Si può affermare a questo punto che una prima bozza del modello two-steps sia disponibile poiché il metodo proposto in questo lavoro permette di avere un “coupling” adeguato tra le fasi di *rilascio* e *dispersione*. Questo primo modello potrà essere sfruttato ad esempio come strumento per lo sviluppo di un protocollo di progettazione della sensoristica Fire&Gas.

Un passo molto importante che dovrà essere fatto è sicuramente quello della validazione del modello; a tal proposito, nel progetto MISE in cui rientra tale lavoro, è prevista anche la costruzione di un laboratorio sperimentale che ora è in fase di progettazione.

Infine per un ulteriore sviluppo del progetto sarà necessario ampliare il catalogo di source box, aggiungendone altre con parametri (pressioni, dimensioni del foro, tipi di ostacolo ecc.) differenti, in modo da coprire un numero minimo indispensabile di casi rappresentativi delle situazioni incidentali più frequenti che si possono verificare in ambito Oil&Gas.

Realizzare una simulazione CFD accurata e realistica è sempre molto complicato, soprattutto se, come in questo caso, si ha a che fare con una fisica del fenomeno e con una geometria del dominio così complesse; le criticità derivanti da questi due fattori sono state in parte superate grazie all’innovazione introdotta con l’approccio two-steps, che dovrà essere sicuramente ancora sviluppato. Per concludere si può dire che questo modello può essere ritenuto una valida alternativa agli approcci semi-empirici tipicamente usati in ambito di analisi di rischio per eventi incidentali del genere.

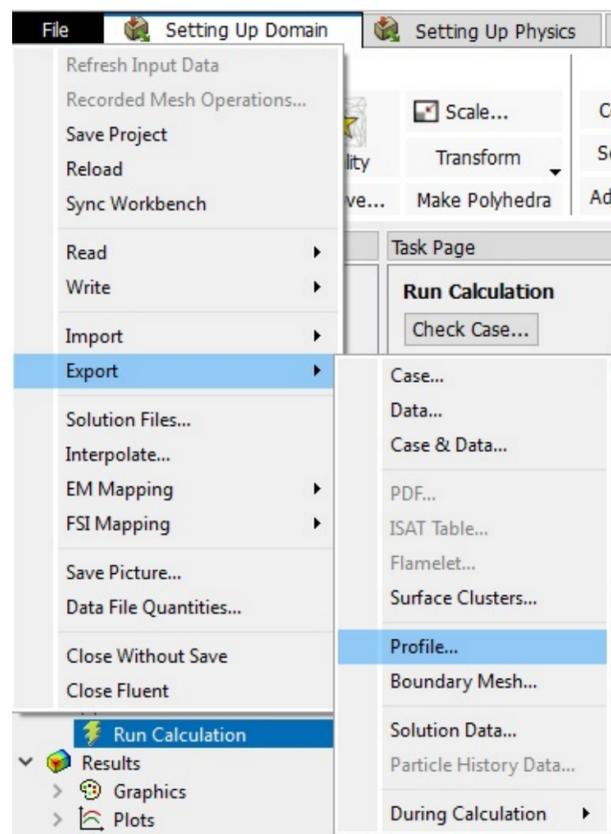
BIBLIOGRAFIA

- [1] Consiglio dell'Unione Europea, Parlamento europeo, "DIRETTIVA 2013/30/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO", 2013.
- [2] Parlamento Europeo, "DECRETO LEGISLATIVO 18 agosto 2015 n.145", 2015.
- [3] F. Terlizze, "Editoriale MISE", introduzione della rivista Geoingegneria Ambientale e Mineraria n. 152, 2017.
- [4] DGS UNMIG e Politecnico di Torino, "Sicurezza degli impianti di estrazione di idrocarburi in mare" (comunicato stampa), 2018.
- [5] A. Carpignano, "Risk Analysis Booklet", Politecnico di Torino, 2017.
- [6] Politecnico di Torino, "DSG UNMIG AND POLITECNICO DI TORINO – SEADOG LAB: TOGETHER TO ENSURE OFFSHORE SAFETY" (documento di accordo con il Ministero dello Sviluppo), 2017.
- [7] A. Tortora, "Progettazione di un laboratorio sperimentale per lo studio della dispersione di inquinanti in piattaforme Oil&Gas supportata da modellazione CFD", Politecnico di Torino, 2018.
- [8] N. Bono, "Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti Oil&gas offshore", Politecnico di Torino, 2018.
- [9] A. C. Ugenti, A. Carpignano, L. Savoldi, R. Zanino, F. Ganci, "Perspective and criticalities of CFD modelling for the analysis of oil and gas offshore accident scenarios", atti del convegno: ESREL 2016, 2016.
- [10] A. C. Ugenti, R. Gerboni, F. Ganci, "Models and tools for the simulation of exhaust dispersion in oil and gas offshore platforms", atti del convegno: ESREL 2016, 2016.
- [11] C. Rupolo, "Modellizzazione CFD del rilascio di gas compressi in ambiente off-shore: source boxes", Politecnico di Torino, 2018.
- [12] E. Carrozza, "Modellazione CFD per lo studio di rilasci e dispersione atmosferica di inquinanti in piattaforme Oil&Gas", Politecnico di Torino, 2018.
- [13] "www.iea.org", disponibile il 28/11/2018.
- [14] IEA, "World Energy Balances 2018 Overview", 2018.
- [15] IEA, "Oil Information 2018 Overview", 2018.
- [16] IEA, "Natural gas information 2018 Overview", 2018.
- [17] Ministero dello Sviluppo Economico-DSG, "Bilancio Energetico Nazionale 2016", 2017.
- [18] Eni, "World Oil & Gas Review 2014", 2014.
- [19] Eni, "Gas Naturale", "<http://www.eniscuola.net>", disponibile il 20/10/2018.
- [20] Istituto dell'enciclopedia italiana, "Enciclopedia Degli Idrocarburi", Roma, 2005.
- [21] Giacchetta et al., "La sicurezza delle operazioni in mare nel settore idrocarburi e la nuova direttiva europea 2013/30/UE", Valutazione e Gestione del Rischio negli Insediamenti Civili ed Industriali, 2016.
- [22] "www.focus.it", "Come fanno le piattaforme a rimanere ferme in mare?", disponibile il 28/11/2018.
- [23] "www.offshoretechllc.com", disponibile il 28/11/2018.
- [24] Dr. S. Nallayarasu, "Offshore Structures, Analysis and Design", Indian Institutes of Technology Madras.
- [25] "www.drillingformulas.com", disponibile il 28/11/2018.
- [26] "www.berlianswendoblp.blogspot.com", disponibile il 28/11/2018.
- [27] "www.brighthubengineering.com", disponibile il 28/11/2018.
- [28] F. Pallavicini, "Sviluppo di giacimenti in mare", Enciclopedia degli idrocarburi, Roma, 2005.
- [29] Istituto dell'enciclopedia italiana, "Enciclopedia Degli Idrocarburi", Roma, 2005.

- [30] “unmig.mise.gov.it”, disponibile il 28/11/2018.
- [31] Shell, “Safety Data Sheet”, “www.shell.com”, 2011.
- [32] Ministero dello Sviluppo Economico-DSG-UNMIG, “Piattaforme marine e strutture assimilabili”, 2018.
- [33] G Sobrero, “Dispense corso LIASE”, Politecnico di Torino, 2017.
- [34] S. Guasco, “Towards the CFD simulation of accidents on off-shore platforms: dispersion of a turbulent jet hitting a flat plate”, Politecnico di Torino, 2015.
- [35] E. Franquet et al., “Free underexpanded jets in a quiescent medium: A Review”, *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 77, pp 25-53, 2015.
- [36] N. J. Dam et al., “Imaging of an underexpanded nozzle flow by UV laser Rayleigh scattering”, *Experiments in Fluids*, vol. 24, Issue 2, pp 93-101, 1998.
- [37] A. Abdelhamid et al., “Mach disk and Riemann wave in underexpanded jet flows”, atto di 2nd Fluid and Plasma dynamics Conference, 1969.
- [38] J. Choin et al., “A CFD simulation of hydrogen dispersion for the hydrogen leakage from a fuel cell vehicle in an underground parking garage”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 38, Issue 19, pp 8084-8091, 2013.
- [39] H. Wilkening et al., “CFD modelling of accidental hydrogen release from pipelines”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 32, Issue 13, pp 2206-2215, 2007.
- [40] E. Pederiva, “Towards the CFD simulation of accidents on off-shore platforms: dispersion of a turbulent jet hitting a cylinder”, Politecnico di Torino, 2015.
- [41] T. Corti, “CFD modelling of accidental events in oil&gas environment: definition of a source box”, Politecnico di Torino, 2016.
- [42] S. Crist et al., “Study of the highly underexpanded sonic jet”, *AIAA Journal*, Volume 4, No.1, pp 68-71, 1966.
- [43] J.H Ferziger et al., “Computational Methods for Fluid Dynamics 3rd edition”, Springer, 2002.
- [44] R. Zanino, “slides CFD”, Politecnico di Torino, 2017.
- [45] ANSYS, “Fluent Guide” (guida).
- [46] “<http://www.enginsoft.it/software/ansys/cfd/fluent/index.html>”, disponibile il 28/11/2018.
- [47] “<https://www.ozeninc.com/ansys-fluent-features/>”, disponibile il 28/11/2018.
- [48] R. Munson et al., “Chapter 9: Flow over immersed bodies”, *Fluid Mechanics 7th edition*, Wiley, 2013.
- [49] F. P. Incropera et al., “Chapter 7: External Flow”, *Fluid Mechanics 7th edition*, Wiley, 2013.
- [50] ISPRA, “Rete Mareografica Nazionale”, disponibile il 28/11/2018.
- [51] Windfinder, “<https://it.windfinder.com/windstatistics>”, disponibile il 28/11/2018.
- [52] S.Doroudi, “ANSYS Fluent Modeling of an Underexpanded Supersonic Sootblower Jet Impinging Into Recovery Boiler Tube Geometries”, University of Toronto, 2015.
- [53] I.C. Toliás et al., “Best practice guidelines in numerical simulations and CFD benchmarking for hydrogen safety applications”, *International Journal of Hydrogen Energy* XXX (2018) 1-13, 2018.
- [54] Xiong Liu et al., “Source strength and dispersion of CO₂ releases from high-pressure pipelines: CFD model using real gas equation of state”, *Applied Energy*, Volume 126, pp 56-68, 2014.
- [55] Xiao Jian Li et al., “CFD analysis of natural gas dispersion in engine room space based on multi factor coupling”, *Ocean Engineering*, Volume 111, pp 524-532, 2016.

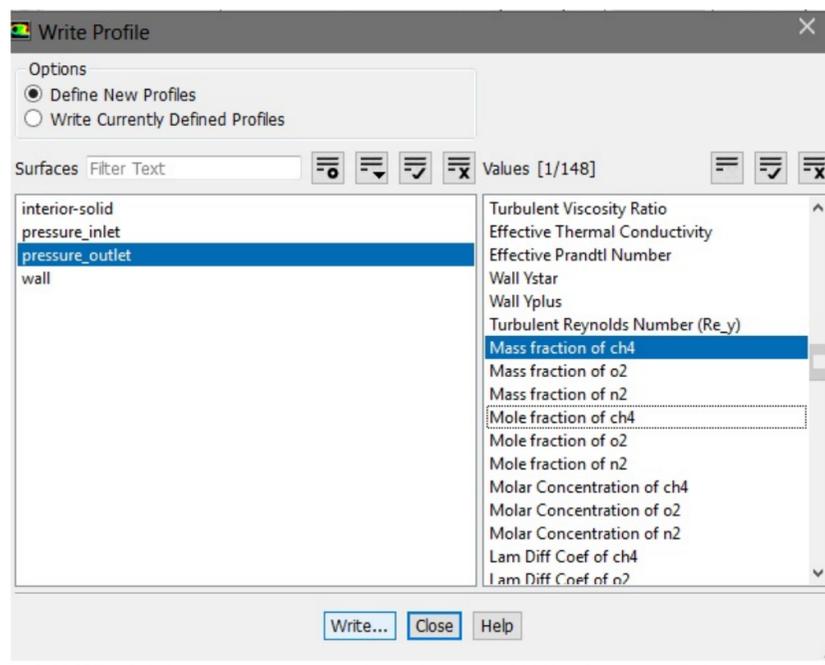
APPENDICE A

Vediamo ora i passaggi da effettuare per estrapolare i dati e successivamente elaborarli. Innanzitutto bisogna estrapolare dalle facce di output di interesse i valori che servono e, per fare ciò, basta cliccare su “File” -> “Export” -> “Profile” come illustrato nella prossima figura:



Export Profile

A questo punto si aprirà questa finestra:



Write Profile

in cui selezionare a sinistra la faccia dalla quale si vuole prendere il profilo ad esempio in questo caso “pressure_outlet”, a destra la grandezza di interesse, in questo caso ad esempio “Mass fraction of ch4”; una volta cliccato su “Write...” si potrà dare il nome al file che verrà salvato con estensione “.PROF”.

APPENDICE B

Prima di usare tali script però c'è un passaggio molto importante da effettuare; bisogna aprire il file .PROF con l'applicazione "Blocco note", scrivere il carattere "%" prima di ogni riga che non contenga valori e *annotarsi* il numero che compare sulla prima riga e a questo punto ris salvare il file con estensione ".txt", chiamandolo nel modo appropriato, come si spiegherà nel prossimo passaggio. Il nome da assegnare ad ogni file deve essere specifico a seconda della faccia e della grandezza in questione come spiega il prossimo elenco:

- Frazione in massa di CH₄ su faccia north: "ch4massfy_z";
- Frazione in massa di CH₄ su faccia up: "ch4massfx_z";
- Velocità su faccia north: "vely_z";
- Componenti di velocità su faccia up (tre file separati): "xvelx_z", "yvelx_z" e "zvelx_z".

A questo punto bisogna inserire il valore che ci si è annotati in precedenza (che compare sulla prima riga di ogni file) all'interno degli script Matlab assegnandolo alla variabile N, ad esempio nel caso della faccia north tale valore è 5249 :

```
N=5249; % Questo numero compare sulla prima riga del file .prof
```

L'ultimo fattore a cui fare attenzione riguarda come va scritto il file di output dei vari script; in particolare bisogna fare attenzione a come scrivere il primo rigo di ogni file, poiché in esso deve comparire un numero che rappresenta quanti nodi sono coinvolti nel profilo. Questo numero dipende da due fattori: il numero N di cui sopra e il numero di simmetrie; ad esempio per la faccia north si hanno due simmetrie per cui la faccia totale è quattro volte quella di partenza, dunque il numero da inserire sulla prima riga del file output è pari a $4 \times N$, ovvero 20996 (vale un discorso analogo per le altre facce):

```
fprintf(northprofile, '((ch4massfnorth point 20996)\n(x\n'));
```

Fatto tutto ciò si possono eseguire i vari script Matlab i cui risultati sono i seguenti file con estensione ".PROF":

- "ch4massfnorth": profilo frazione in massa CH₄ per faccia north (script: APPENDICE C);
- "ch4massfup": profilo frazione in massa CH₄ per faccia up (e down, di cui si farà menzione dopo) (script: APPENDICE D);
- "velnorth": profilo di velocità faccia north (script: APPENDICE E)
- "xvelup": profilo componente x della velocità faccia up (e down) (script:APPENDICE F);
- "yvelup": profilo componente y della velocità faccia up (script: APPENDICE G);
- "yveldown": profilo componente y della velocità faccia down (script: APPENDICE G);
- "zvelup": profilo componente z della velocità faccia up (e down) (script: APPENDICE H).

Questi file hanno l'estensione giusta per essere usati in ANSYS Fluent.

APPENDICE C

```
clear all
close all
clc
%% Dati che servono
% Numero sulla prima riga
% Nome variabile

%%
% Carico profilo y_z (ricordarsi di commentare le scritte sul file
di
% partenza)
N=5249; % Questo numero compare sulla prima riga del file .prof
originale
y_zprofile=load('ch4massfy_z.txt');
x=y_zprofile(1:N);
y=y_zprofile(N+1:2*N);
z=y_zprofile(2*N+1:3*N); % negative
data=y_zprofile(3*N+1:4*N);

% Modifica dati per ottenere yzprofile
x2=x;
y2=y;
z2=-z;

% Modifica dati per ottenere _yzprofile
x3=x;
y3=-y;
z3=-z;

% Modifica dati per ottenere _y_zprofile
x4=x;
y4=-y;
z4=z;

% Costruisco profilo totale
xtot=[x;x2;x3;x4];
ytot=[y;y2;y3;y4];
ztot=[z;z2;z3;z4];
datatot=[data;data;data;data];
Ntot=4*N;
northprofile=fopen('ch4massfnorth.prof','wt');
fprintf(northprofile, '((ch4massfnorth point 20996)\n(x\n'); % va
messo Ntot
fprintf(northprofile, '%f\n',xtot);
fprintf(northprofile,')\n(y\n');
fprintf(northprofile, '%f\n',ytot);
fprintf(northprofile,')\n(z\n');
fprintf(northprofile, '%f\n',ztot);
fprintf(northprofile,')\n(ch4\n'); % deve esserci scritto quello
che c'è scritto nel file originale
fprintf(northprofile, '%f\n',datatot);
fprintf(northprofile,')\n)\n');
```

APPENDICE D

```
clear all
close all
clc

%% Dati che servono
% Numero sulla prima riga
% Nome variabile

%%
% Carico profilo x_z (ricordarsi di commentare le scritte sul file
di
% partenza)
N=10315; % Questo numero compare sulla prima riga del file .prof
originale
x_zprofile=load('ch4massfx_z.txt');
x=x_zprofile(1:N);
y=x_zprofile(N+1:2*N);
z=x_zprofile(2*N+1:3*N); % negative
data=x_zprofile(3*N+1:4*N);

% Modifica dati per ottenere xzprofile
x2=x;
y2=y;
z2=-z;

% Costruisco profilo totale
xtot=[x;x2];
ytot=[y;y2];
ztot=[z;z2];
datatot=[data;data];

upprofile=fopen('ch4massfup.prof','wt');
fprintf(upprofile, '(ch4massfup point 20630)\n(x\n'); % il numero
sarà N*4
fprintf(upprofile, '%f\n',xtot);
fprintf(upprofile, ')\n(y\n');
fprintf(upprofile, '%f\n',ytot);
fprintf(upprofile, ')\n(z\n');
fprintf(upprofile, '%f\n',ztot);
fprintf(upprofile, ')\n(ch4\n'); % deve esserci scritto quello che
c'è scritto nel file originale
fprintf(upprofile, '%f\n',datatot);
fprintf(upprofile, ')\n)\n');
```

APPENDICE E

```
clear all
close all
clc
%% Dati che servono
% Numero sulla prima riga
% Nome variabile

%%
% Carico profilo y_z (ricordarsi di commentare le scritte sul file
di
% partenza)
N=5249; % Questo numero compare sulla prima riga del file .prof
originale
y_zprofile=load('vely_z.txt');
x=y_zprofile(1:N);
y=y_zprofile(N+1:2*N);
z=y_zprofile(2*N+1:3*N); % negative
data=y_zprofile(3*N+1:4*N);

% Modifica dati per ottenere yzprofile
x2=x;
y2=y;
z2=-z;

% Modifica dati per ottenere _yzprofile
x3=x;
y3=-y;
z3=-z;

% Modifica dati per ottenere _y_zprofile
x4=x;
y4=-y;
z4=z;

% Costruisco profilo totale
xtot=[x;x2;x3;x4];
ytot=[y;y2;y3;y4];
ztot=[z;z2;z3;z4];
datatot=[data;data;data;data;];
northprofile=fopen('velnorth.prof','wt');
fprintf(northprofile, '((velnorth point 20996)\n(x\n');
fprintf(northprofile, '%f\n',xtot);
fprintf(northprofile,')\n(y\n');
fprintf(northprofile, '%f\n',ytot);
fprintf(northprofile,')\n(z\n');
fprintf(northprofile, '%f\n',ztot);
fprintf(northprofile,')\n(velocity-magnitude\n'); % deve esserci
scritto quello che c'è scritto nel file originale
fprintf(northprofile, '%f\n',datatot);
fprintf(northprofile,')\n)\n');
```

APPENDICE F

```
clear all
close all
clc

%% Dati che servono
% Numero sulla prima riga
% Nome variabile

%%
% Carico profilo x_z (ricordarsi di commentare le scritte sul file
di
% partenza)
N=10315; % Questo numero compare sulla prima riga del file .prof
originale
x_zprofile=load('xvelx_z.txt');
x=x_zprofile(1:N);
y=x_zprofile(N+1:2*N);
z=x_zprofile(2*N+1:3*N); % negative
data=x_zprofile(3*N+1:4*N);

% Modifica dati per ottenere xzprofile
x2=x;
y2=y;
z2=-z;

% Costruisco profilo totale
xtot=[x;x2];
ytot=[y;y2];
ztot=[z;z2];
datatot=[data;data];
upprofile=fopen('xvelup.prof','wt');
fprintf(upprofile, '((xvelup point 20630)\n(x\n'); %Bisogna
ricreare un file con la stessa struttura di quello iniziale,
%questa scritta
sul primo rigo deve essere quanto più chiara possibile,
%perché sarà ciò
che comparirà in profiles
fprintf(upprofile, '%f\n',xtot);
fprintf(upprofile, ')\n(y\n');
fprintf(upprofile, '%f\n',ytot);
fprintf(upprofile, ')\n(z\n');
fprintf(upprofile, '%f\n',ztot);
fprintf(upprofile, ')\n(x-velocity\n'); % deve esserci scritto
quello che c'è scritto nel file originale
fprintf(upprofile, '%f\n',datatot);
fprintf(upprofile, ')\n)\n');
```

APPENDICE G

```
clear all
close all
clc

%% Dati che servono
% Numero sulla prima riga
% Nome variabile

%%
% Carico profilo x_z (ricordarsi di commentare le scritte sul file
di
% partenza)
N=10315; % Questo numero compare sulla prima riga del file .prof
originale
x_zprofile=load('yvelx_z.txt');
x=x_zprofile(1:N);
y=x_zprofile(N+1:2*N);
z=x_zprofile(2*N+1:3*N); % negative
data=x_zprofile(3*N+1:4*N);
for i=1:N
    if data(i)<0
        data(i)=0;
    end
end
clear x_zprofile;

% Modifica dati per ottenere xzprofile
x2=x;
y2=y;
z2=-z;

% Costruisco profilo totale
xtot=[x;x2];
ytot=[y;y2];
ztot=[z;z2];
datatot=[data;data];

upprofile=fopen('yvelup.prof','wt');
fprintf(upprofile, '((yvelup point 20630)\n(x\n'); %Bisogna
ricreare un file con la stessa struttura di quello iniziale,
%questa scritta
sul primo rigo deve essere quanto più chiara possibile,
%perché sarà ciò
che comparirà in profiles
fprintf(upprofile, '%f\n',xtot);
fprintf(upprofile,')\n(y\n');
fprintf(upprofile, '%f\n',ytot);
fprintf(upprofile,')\n(z\n');
fprintf(upprofile, '%f\n',ztot);
fprintf(upprofile,')\n(y-velocity\n'); % deve esserci scritto
quello che c'è scritto nel file originale
fprintf(upprofile, '%f\n',datatot);
```

```

fprintf(upperprofile,')\n)\n');

% componente y verso il basso
datatot1=-1.*datatot;
downprofile=fopen('yveldown.prof','wt');
fprintf(downprofile, '((yveldown point 20630)\n(x\n'); %Bisogna
ricreare un file con la stessa struttura di quello iniziale,
%questa scritta
sul primo rigo deve essere quanto più chiara possibile,
%perché sarà ciò
che comparirà in profiles
fprintf(downprofile,'%f\n',xtot);
fprintf(downprofile,')\n(y\n');
fprintf(downprofile,'%f\n',ytot);
fprintf(downprofile,')\n(z\n');
fprintf(downprofile,'%f\n',ztot);
fprintf(downprofile,')\n(y-velocity\n'); % deve esserci scritto
quello che c'è scritto nel file originale
fprintf(downprofile,'%f\n',datatot1);
fprintf(downprofile,')\n)\n');

```

APPENDICE H

```
clear all
close all
clc

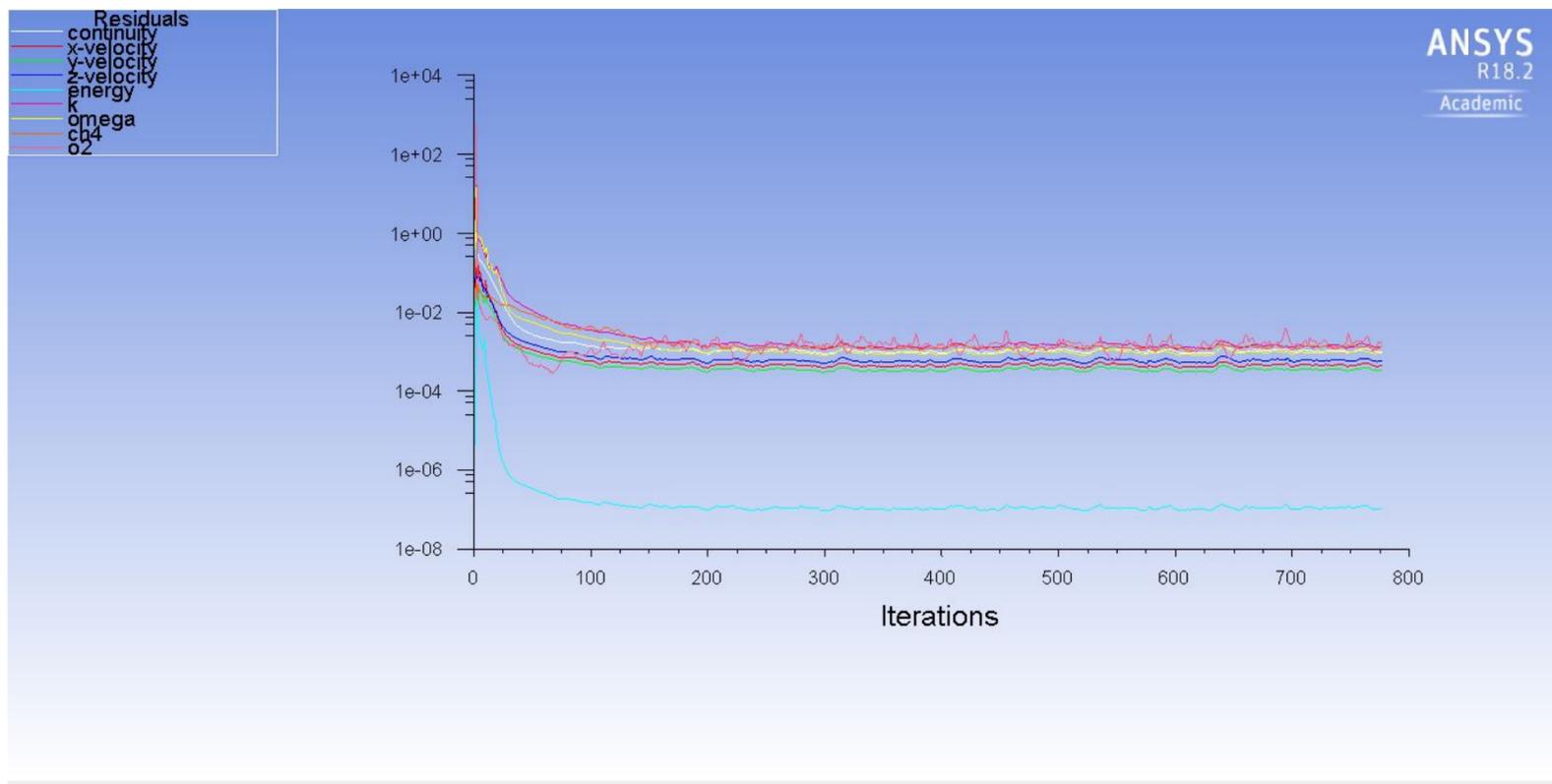
%% Dati che servono
% Numero sulla prima riga
% Nome variabile

%%
% Carico profilo x_z (ricordarsi di commentare le scritte sul file
di
% partenza)
N=10315; % Questo numero compare sulla prima riga del file .prof
originale
x_zprofile=load('zvelx_z.txt');
x=x_zprofile(1:N);
y=x_zprofile(N+1:2*N);
z=x_zprofile(2*N+1:3*N); % negative
data=x_zprofile(3*N+1:4*N);

% Modifica dati per ottenere xzprofile
x2=x;
y2=y;
z2=-z;

% Costruisco profilo totale
xtot=[x;x2];
ytot=[y;y2];
ztot=[z;z2];
datatot=[data;data];
upprofile=fopen('zvelup.prof','wt');
fprintf(upprofile, '((zvelup point 20630)\n(x\n'); %Bisogna
ricreare un file con la stessa struttura di quello iniziale,
%questa scritta
sul primo rigo deve essere quanto più chiara possibile,
%perché sarà ciò
che comparirà in profiles
fprintf(upprofile, '%f\n',xtot);
fprintf(upprofile, ')\n(y\n');
fprintf(upprofile, '%f\n',ytot);
fprintf(upprofile, ')\n(z\n');
fprintf(upprofile, '%f\n',ztot);
fprintf(upprofile, ')\n(z-velocity\n'); % deve esserci scritto
quello che c'è scritto nel file originale
fprintf(upprofile, '%f\n',datatot);
fprintf(upprofile, ')\n)\n');
```

APPENDICE I



Residui

Esempio di andamento dei residui per le simulazioni “one step”; in tutte le simulazioni si è ottenuto un andamento del genere, in modo da avere una Chiara convergenza dei residui, assestata su un ordine di grandezza inferior a 0.01.