

# **POLITECNICO DI TORINO**

Corso di Laurea in Ingegneria Energetica e Nucleare

Tesi di Laurea Magistrale

## **Modellazione CFD per lo studio di rilasci e dispersione atmosferica di inquinanti in piattaforme Oil&Gas**



Relatori

Prof. Andrea Carpignano

Ing. Francesco Ganci

Candidato

Emanuela Carrozza

Anno Accademico 2017 - 2018

*Alla mia famiglia che mi ha sempre supportato*

*Ad Andrea che ha sempre creduto in me*

## **Abstract**

The development of increasingly complex technological systems has imposed a different approach to the design management and regulation of risk systems and has required higher levels of safety on industrial processes. Therefore, it is extremely important to consider the safety of the system as an integral part of the project in order to prevent and mitigate the effects of accidental scenarios.

In the context of offshore Oil&Gas platforms safety and risk analysis, the evaluation of the consequences of an accidental event is a crucial aspect. Technological Risk Assessment can be an efficient way to identify the hazards in a complex system, while Consequences analysis is focused on the prediction of accidental scenarios and consequences in order to quantify the involved risk. An accurate model of the physical processes is needed to evaluate the consequences and therefore the associated risk of an event to be prevented and/or mitigated. This work concerns the analysis of consequences of a highpressure methane release and its dispersion in a deck of an offshore platform as case study. A simplified geometry of an offshore Oil&Gas installation is chosen and a single deck is analysed.

The proposed model separates the phases of release and gas dispersion in order to reduce and optimize the required computational cost. The first phase of gas release is modelled as a black box, called source box. The outputs of this first phase become the inputs of dispersion modelling. The aim of this study is the identification of the input parameter of the dispersion simulation and a correct implementation of dispersion model in a platform deck in order to identify the flammable cloud volume and the zoned involved during a potential accident. These parameters are necessary for the consequence assessment because influence the physical phenomena that can be happen in the plant and their locations.

The risk analysis and consequence assessment of this case study is performed using Computational Fluid Dynamics models because they are able to study complex geometries and phenomena and simulate high risk systems. The purpose of this work is to evaluate the practicability of this methodological approach, advantages and defects.

## Abstract

Lo sviluppo di un sistema tecnologico sempre più complesso ha imposto un approccio diverso alla gestione della progettazione e alla regolamentazione dei sistemi di rischio e ha richiesto livelli più elevati di sicurezza sui processi industriali. Pertanto, è estremamente importante considerare la sicurezza del sistema come parte integrante del progetto al fine di prevenire e mitigare gli effetti di scenari accidentali.

Nel contesto della sicurezza e analisi del rischio delle piattaforme petrolifere offshore, la valutazione delle conseguenze di eventi incidentali è un aspetto cruciale. La valutazione del rischio può essere un modo efficace per identificare i pericoli in un sistema complesso, mentre l'analisi delle conseguenze è focalizzata sulla previsione delle conseguenze di scenari incidentali al fine di quantificare il rischio. Per essere in grado di modellare bene i processi fisici è importante conoscere le conseguenze e prevenire o mitigare gli effetti di un incidente. Questo lavoro tratta come caso studio l'analisi delle conseguenze di un rilascio di metano ad alta pressione e il fenomeno di dispersione in un piano di una piattaforma offshore. È stata scelta una geometria semplificata di un'installazione Oil&Gas offshore ed analizzato un solo piano.

Il modello proposto separa le fasi di rilascio e dispersione di gas al fine di ridurre il costo computazionale richiesto dalla modellazione. La prima fase del rilascio di gas è modellata tramite una scatola nera, chiamata source box. L'output della prima fase diventa l'input della modellazione di dispersione. Lo scopo di questo studio è l'identificazione del parametro di input della simulazione di dispersione ed una corretta implementazione della modellazione di dispersione in un deck di piattaforma in termini di volume della nube infiammabile e zone raggiunte, a causa di un evento accidentale. Il volume della nube infiammabile è utile per la valutazione delle conseguenze, poiché influenza i fenomeni fisici che possono verificarsi nell'impianto.

L'analisi del rischio e la valutazione delle conseguenze di questo caso studio sono state eseguite utilizzando i modelli di fluidodinamica computazionale perché sono in grado di considerare complesse geometrie e fenomeni. La modellazione tramite fluidodinamica computazionale ha alcune caratteristiche importanti che consentono di studiare sistemi complessi e simulare sistemi ad alto rischio. Lo scopo di questo lavoro è valutare la praticabilità di questo approccio metodologico, vantaggi e difetti.

# Sommario

<b>Abstract</b> .....	3
Introduzione.....	7
1. Contestualizzazione .....	9
1.1 Obiettivo della tesi .....	12
1.2 Analisi del rischio .....	15
1.2.1 Approccio qualitativo .....	18
1.2.2 Approccio quantitativo.....	21
1.2.3 Analisi delle conseguenze .....	23
1.3 Piattaforma offshore.....	26
1.3.1 Sostanze coinvolte e l’offshore in Italia .....	31
1.4 Fluidodinamica computazionale .....	37
1.4.1 Pre-processing.....	39
1.4.2 Solving .....	42
1.4.3 Post-processing .....	43
1.4.4 Turbolenza.....	43
2. Stato dell’arte .....	46
2.1 Analisi dei diversi approcci.....	46
2.2 Analisi del problema da affrontare .....	49
3. Utilizzo della source box nello studio di dispersione in piattaforma .....	50
3.1 Richiami al concetto di Source box .....	53
3.2 Source box come black box per i modelli di dispersione CFD .....	56
4. Definizione del caso studio e modellazione CFD.....	62
4.1 Modellazione con Ansys Fluent.....	62
4.2 Geometria.....	65
4.3 Boundary conditions .....	71
4.4 Definizione della mesh.....	76
4.5 Grid Independence .....	83
5. Simulazioni di dispersione e analisi critica dei risultati .....	95
5.1 Impostazione delle simulazioni.....	96

5.2 Descrizione dei casi studio.....	97
5.2.1 Variazione della concentrazione totale di sostanza infiammabile uniforme sul profilo....	100
5.2.2 Distribuzione della concentrazione sul profilo.....	108
5.2.3 Variazione della velocità di rilascio .....	118
5.3 Discussione dei risultati .....	122
6. Conclusioni e sviluppi futuri.....	125
Indice delle figure e delle tabelle .....	127
Ringraziamenti .....	131
Bibliografia.....	132

## Introduzione

Con lo sviluppo di nuove ed avanzate tecnologie è cresciuta la **consapevolezza** degli impatti negativi che ne possono derivare e la necessità di riconciliare lo sviluppo industriale con l'ambiente naturale e le aree popolate. È risultato necessario un approccio differente per la progettazione, gestione e regolamentazione dei sistemi a rischio, che dia maggiore importanza alle misure di prevenzione e mitigazione e alle possibili conseguenze di incidenti. Le conseguenze sono intese sia in termini di danni per la salute dei lavoratori e per l'ambiente, che di costi legati alla perdita di produzione e ai danni operativi.

Alla luce di ciò, risulta dunque fondamentale adottare procedure sia di progettazione che di gestione degli impianti che risultano quanto più possibile esenti da **errori**. È di estrema importanza considerare la **sicurezza** del sistema come parte integrante del progetto con il fine di prevenire e mitigare gli effetti degli scenari incidentali.

L'aumento della richiesta mondiale di energia e un'economia in continua evoluzione ha fatto sviluppare il settore Oil&Gas. A livello mondiale oggi si stima un incremento della domanda energetica del 25% entro il 2040 e, nonostante la possibilità di fonti di energia diversificate, il petrolio rimarrà la principale, mentre il **gas naturale** è la fonte di energia con la maggiore crescita [1]. La maggior parte delle riserve mondiali si trovano nei fondali marini con aree produttive offshore, tali risorse sono abbondanti e continueranno ad aumentare a passo con lo sviluppo tecnologico, grazie alla scoperta di zone ad "acque profonde" ancora poco esplorate. Gli impianti di perforazione e produzione offshore sono dunque **indispensabili** per soddisfare la richiesta crescente di idrocarburi.

La piattaforma petrolifera è un ambiente in cui la **valutazione delle conseguenze e l'analisi del rischio** hanno assunto un ruolo di primaria importanza nei processi tipici di estrazione e produzione, dovuto sia alle caratteristiche delle sostanze trattate (infiammabilità, tossicità, etc.) che alle caratteristiche ambientali e meteorologiche tipiche della posizione geografica. La valutazione delle conseguenze e l'analisi del rischio sono finalizzate all'identificazione di eventuali pericoli e alle strategie di prevenzione e mitigazione.

Il **contesto** in cui si colloca tale studio è la valutazione del rischio e delle conseguenze sulle piattaforme petrolifere offshore, in particolare lo studio di un caso di rilascio di sostanza infiammabile in condizioni incidentali.

Tramite modelli di rilascio e dispersione si analizza l'evento in esame in modo tale da valutare, al variare di condizioni iniziali di rilascio, l'evoluzione di nubi di materiale infiammabile e da identificare le zone più pericolose presenti in ambiente piattaforma e i possibili fenomeni e conseguenze che ne derivano.

L'attività è stata svolta in parte presso l'azienda RAMS&E con un tirocinio volto ad approfondire gli aspetti tecnici e professionali della valutazione del rischio in ambito Oil&Gas e in parte presso SEADOG, laboratorio nato da una collaborazione tra il Politecnico di Torino e il MISE DSG.

Si vuole presentare in breve la **struttura** della presente tesi.

Il primo capitolo riguarda la **contestualizzazione** del lavoro svolto ed un'analisi generale dei temi che verranno trattati. In particolare, verrà descritta l'analisi del rischio contestualizzata in ambiente oil&gas, la descrizione della struttura delle piattaforme facendo riferimento al territorio italiano e lo strumento di simulazione numerica utilizzato per la modellazione di eventi incidentali.

Il secondo capitolo è una presentazione di tutti gli **approcci** presenti in letteratura e spiega il percorso scelto per l'analisi e le motivazioni. Analizza il problema da affrontare e gli step necessari per la risoluzione.

Il terzo capitolo analizza l'approccio di valutazione scelto per il caso studio, quale il rilascio di metano da una pipeline, focalizzando l'attenzione sul concetto innovativo di **source box**, la possibilità di separare il rilascio in due fasi quale la fase di rilascio e di dispersione e l'utilizzo della source box nelle simulazioni di **dispersione**.

Il quarto capitolo è una descrizione del dominio scelto come caso studio e descrive tutte le impostazioni scelte per la **modellazione** con il software. Per la scelta di alcune impostazioni, quale la mesh, è stata svolta un'analisi di indipendenza della soluzione dalla griglia riducendo errori di approssimazione e garantendo tempi computazionali accettabili.

Il quinto capitolo contiene tutte le **simulazioni di dispersione** svolte al variare di parametri che influenzano le possibili conseguenze e un'analisi dei risultati ottenuti al variare degli input necessari per le simulazioni con l'obiettivo di verificare correlazioni e dipendenze.

Nel sesto capitolo sono mostrati i principali **risultati** e viene data una conclusione generale del lavoro.

# 1. Contestualizzazione

La valutazione e quantificazione delle conseguenze è un aspetto cruciale nella valutazione del rischio nel settore Oil&Gas e permette di migliorare il livello di protezione e controllo dei processi. Questi processi sono caratterizzati da pericoli derivanti dalle caratteristiche di infiammabilità e tossicità delle sostanze coinvolte.

In questa tesi, si prenderà in considerazione il quantitativo e le condizioni della sostanza rilasciata in termini di infiammabilità e di tossicità con l'obiettivo di identificare i fenomeni che ne derivano. La quantificazione delle conseguenze, derivanti dai possibili scenari incidentali, è di primaria importanza per la protezione delle persone e la tutela dell'ambiente. Da ciò deriva la necessità di simulare eventi incidentali in ambito off-shore.

In ambito oil&gas sono avvenuti nel passato numerosi e significativi **incidenti** industriali, alcuni dei quali riportati nella Tabella 1.1 mostrata in seguito.

I danni e le conseguenze generate hanno posto l'attenzione sull'importanza della sicurezza e dell'analisi del rischio a causa della pericolosità insita nel settore petrolifero.

L'ultimo catastrofico incidente, il *Deepwater Horizon* del 20 Aprile 2010 nel Golfo del Messico, mostrato in Figura 1.1, ha aumentato la sensibilità a simili eventi e ha innescato una serie di adeguamenti normativi. [2] La commissione Europea si è impegnata ad analizzare i fattori che hanno generato tale evento, al fine di trovare una soluzione e portare alla riduzione del verificarsi di incidenti gravi. Per evitare ulteriori eventi simili, l'EU ha preso la decisione di esplorare le cause e la dinamica dell'incidente, capire i possibili miglioramenti da attuare, trovare i punti di debolezza e imporre una direttiva come supporto legislativo con l'obiettivo di fissare standard di sicurezza per limitare le conseguenze e proteggere la salute dei lavoratori e l'ambiente. [3]



*Figura 1.1: Disastro del Golfo del Messico: Deepwater Horizon*

La direttiva 2013/30/UE detta anche “*Direttiva Offshore*”, recepita in Italia come Decreto Legislativo 18 agosto 2015, n.145 [4], sulla sicurezza delle operazioni in mare nel settore degli idrocarburi ha posto delle modifiche alla precedente direttiva 2004/35/CE.

Le finalità della direttiva come spiegato nell’articolo 1 in [2], è quello di fissare dei limiti di sicurezza per le attività in piattaforme in mare aperto, in modo tale da ridurre le probabilità di verificarsi di incidenti gravi, al fine di limitare le conseguenze e aumentare la protezione dell’ambiente marino.

*“La presente direttiva stabilisce i requisiti minimi per prevenire gli incidenti gravi nelle operazioni in mare nel settore degli idrocarburi e limitare le conseguenze di tali incidenti”.*  
[2]

Gli incidenti che possono avere luogo in ambiente oil&gas sono numerosi e differenti tra loro, perciò il concetto di incidente grave, *major accident*, presente nel primo articolo viene spiegato e definito nel secondo articolo della direttiva.

*“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”*  
[2]

*“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”* [2]

Nell’Articolo 3 è invece evidenziata la responsabilità dell’operatore sulle garanzie che deve fornire per garantirne la sicurezza.

*“Gli Stati membri obbligano gli operatori a provvedere affinché siano adottate tutte le misure adeguate a prevenire incidenti gravi in operazioni in mare nel settore degli idrocarburi.”* [2]

La nuova direttiva dunque pone l’attenzione sulla sicurezza nelle piattaforme offshore e sull’importanza dell’analisi di rischio nella fase di progettazione della piattaforma. In tale fase, infatti, bisogna considerare tutte le possibili precauzioni e misure di mitigazione affinché il livello di rischio sia accettabile.

La valutazione del rischio viene svolta in modo da aumentare la protezione e il controllo dei processi dell’impianto con il duplice obiettivo di prevenire potenziali danni e corrispettive conseguenze, e di ridurre quanto possibile il tempo che l’impianto deve stare spento a causa degli eventuali incidenti.

Year	Field/Installation	Platform type	Accident Mechanism	Number of fatalities
1971	Western Offshore n.2	Drill barge	Blowout Explosion Fire	16
1974	Gemini	Jack up	Capsize Foundering	18
1975	Ekofisk Bravo	Steel jacket	Riser Rupture leading to severe fire casualties resulting from life saving capsule falling freely from platform height	3
1976	Deep Sea Driller	Semi-Submersible	Platform grounding whilst under tow near shore. Casualties resulting from falling overboard from capsized lifeboat (TEMPSC)	6
1976	Ocean Express	Jack up	Towing Capsize	13
1977	Helicopter en route		Helicopter Crash	12
1977	South Marsh Island	Jacket	Helicopter accident	17
1978	Helicopter en route		Helicopter Crash	18
1978	Statfjord A	Fixed GBS	Fire inside shaft during construction	5
1979	Bohai II	Jack up	Foundering	72
1980	Ekofisk/Alexander L.Kieland	Semi-Submersible flotel	Structural failure of bracing leading to capsizes	123
1980	Ron Tappmeyer	Jack up	Blowout	19
1982	Ocean Ranger	Semi-Submersible	Other list capsizes	84
1983	Frigg/Byford Dolphin	Semi-Submersible	Diving accident occurred on deck, due to falling connection to pressure chamber	5
1983	Glomar Java Sea	Drill ship	Structural damage Leakage List	81
1983	Mibale, M weel Protector	Jacket	Other Explosion Fire	13
1984	Enchova PCE I	Jacket	Blowout Fire	42
1985	Concern	Barge	Loading accident due to wrong loading of cement and sand	10
1985	Trintoc Atlas	Other	Spill/Release Explosion	14
1985	Tonkawa	Drill Barge	List Capsize Foundering	11
1987	Penrod 83	Jack up	Helicopter Accident Fire	15
1988	Piper 15/17 A	Jacket	Spill release, Explosion and fire	167
1989	Seacrest	Drill ship	Structural damage and capsizes	91
1989	High Island Pipeline	Pipeline	Grounding Spill Release Explosion	11
1989	Avco 5	Barge	Other Capsizes	10

*Tabella 1.1: Incidenti significativi in piattaforme Oil&Gas [5]*

## 1.1 Obiettivo della tesi

Il lavoro di tesi proposto si basa su un vasto lavoro di ricerca supportato dal Ministero dello Sviluppo Economico (MISE) - Direzione Generale per la Sicurezza (DGS), in collaborazione con il SEADOG (Safety & Environmental Analysis Division for Oil & Gas) polo di ricerca del Politecnico di Torino che opera nell'ambito della sicurezza, anche ambientale, degli impianti che operano nel settore di estrazione di idrocarburi in mare.

In particolare, il lavoro di ricerca, come riportato in [6], mira ad una realizzazione di modelli numerici per la simulazione di eventi incidentali, derivanti da malfunzionamenti o da eventi catastrofici, a bordo di piattaforme offshore e la progettazione e realizzazione di una installazione sperimentale che riproduca una piattaforma oil&gas offshore in scala ridotta per la validazione dei modelli numerici mediante modelli fisici in scala.

Il contesto generale in cui si colloca questa tesi è dunque l'ambito di *valutazione del rischio* applicato alla sicurezza nelle piattaforme offshore, dove risulta necessaria la simulazione di eventi incidentali per avere un'analisi dettagliata per la stima delle conseguenze. In ambito offshore le dimensioni ridotte e l'ambiente congestionato richiedono modelli che riescano a trattare in maniera accurata la geometria per caratterizzare i fenomeni.

Lo scopo di questo lavoro di tesi è quello di sviluppare modelli predittivi dei fenomeni dispersivi di gas metano, che verranno convalidati sperimentalmente con la realizzazione in scala dell'ambiente di una piattaforma petrolifera; essa mira inoltre ad analizzare a priori i fenomeni che si studieranno sperimentalmente e dettagliatamente nell'arco dei due anni di durata dell'attuale progetto [6].

Questo lavoro di tesi è stato svolto in parallelo ai colleghi Nicolò Bono [7], Andrea Tortora [8] e Carlo Rupolo [9]. In [7], Bono si è occupato della progettazione del laboratorio sperimentale che riproduce una piattaforma petrolifera in scala ridotta per la simulazione di eventi incidentali. In [8], Tortora si è occupato della validazione dei modelli numerici di dispersione, che sono l'oggetto del mio lavoro di tesi, e Rupolo in [9], ha analizzato e validato la modellizzazione del getto comprimibile dovuto al rilascio supersonico di sostanza.

Rientra dunque nell'analisi del rischio di tipo quantitativo, tramite metodi di fluidodinamica computazionale (CFD) che permettono di simulare scenari incidentali tipici delle piattaforme petrolifere.

Vi sono diverse attività che possono provocare eventi catastrofici in questo ambiente di lavoro poiché tutte le operazioni coinvolgono sostanze liquide facilmente infiammabili ad alta pressione e potenzialmente tossiche in spazi relativamente piccoli, con presenza di numerosi ostacoli.

Si è preso in considerazione il fenomeno di rilascio di gas metano ad alta pressione e il fenomeno successivo della dispersione nella piattaforma, dunque verrà analizzato un **major accident** in ambiente offshore.

Tale tesi focalizzerà l'attenzione sulla ricerca della possibilità di migliorare la capacità di usare le simulazioni CFD nel settore oil&gas offshore.

Per portare avanti tale lavoro è stato scelto un approccio che permette di simulare l'incidente, senza troppi costi operativi e computazionali al fine di valutare correttamente il rischio nelle piattaforme offshore

Verrà utilizzato l'approccio **innovativo** caratterizzato dalla divisione delle due fasi di rilascio e dispersione con l'introduzione del concetto di **Source Box**, quale dominio che comprende la prima fase di rilascio di gas caratterizzata dal moto comprimibile.

Questo nuovo approccio è un approccio ibrido che permette di limitare i costi computazionali di un approccio CFD totale.

La prima fase di rilascio è analizzata nel lavoro di tesi del collega Rupolo Carlo [9], con il quale si è svolto uno studio in parallelo per dare continuità allo studio del fenomeno.

In questa tesi è analizzata la seconda fase, di **dispersione** della sostanza infiammabile (metano) nel deck di produzione della piattaforma, partendo dal concetto di source box e focalizzando l'attenzione sul moto del gas incomprimibile, con densità costante. Nella fase di dispersione ci si aspetta che le velocità siano comparabili a quelle del vento e che l'effetto del vento diventi dunque rilevante. Ci si occuperà, dunque, della modellazione del comportamento della nube e la propagazione all'interno della piattaforma.

L'analisi prevede la scelta della geometria da adottare come dominio di calcolo, il posizionamento della Source Box e un'analisi di sensitività legata ai parametri necessari per le impostazioni di simulazione.

L'**obiettivo** è capire i parametri utili da ottenere dalla prima fase di rilascio e il relativo livello di precisione e accuratezza in termini di valori assoluti e precisione spaziale di tali dati di input provenienti dalle superfici della source box.

Nello specifico verranno analizzati alcuni dei parametri che si prevede che abbiano una notevole influenza sull'evoluzione della dispersione in termini di quantità coinvolte e zone raggiunte, quali:

- La velocità di rilascio
- La quantità di gas rilasciato

La valutazione delle conseguenze infatti dipende dalla pericolosità delle sostanze e dalle quantità in gioco presenti, in particolare in termini di quantità che rientrano nel range di infiammabilità della sostanza.

Al crescere della sostanza coinvolta si ha una crescita conseguente della probabilità di innesco a causa anche della presenza di ostacoli.

Al crescere del volume di gas coinvolto nell'incendio o nell'esplosione ci si aspetta che gli effetti associati crescono e dunque anche le zone raggiunte e i componenti coinvolti.

## 1.2 Analisi del rischio

L'*analisi del rischio* è una scienza applicata che a partire dagli anni '60 ha acquisito sempre più importanza e rilevanza in differenti ambiti. [5]

L'analisi del rischio è l'insieme dei processi in grado di identificare i punti deboli del sistema studiato e di quantificare le conseguenze di eventi incidentali che possono avere luogo in ambito industriale, in modo tale da prevenire o mitigare gli effetti che ne derivano. In generale, il processo di identificazione definisce i potenziali *hazards* presenti e l'analisi delle conseguenze determina gli effetti dei vari scenari incidentali che ne possono derivare, con l'obiettivo di salvaguardare la sicurezza dei lavoratori e in generale delle persone presenti in ambienti circostanti.

Il termine sicurezza può avere significati differenti a seconda del contesto a cui si fa riferimento. [10] Il concetto di sicurezza ('Security') come risposta ad un pericolo intenzionale e ('Safety') quello relativo ad un pericolo non intenzionale. In questo lavoro di tesi si farà riferimento al termine sicurezza inteso come *Safety*. La completa sicurezza è un concetto non realistico nella vita reale, si è sicuri quando non vi è alcuna possibilità di danno, dunque quando non vi sono pericoli, *hazards*. Il concetto di rischio è introdotto dunque come distanza dalla condizione di sicurezza.

Un qualsiasi scenario incidentale scaturisce dall'evoluzione di un *evento iniziatore* che può essere un errore umano, un malfunzionamento o un evento esterno che rende concreto il pericolo e dà luogo ad una *sequenza incidentale*. La sequenza incidentale descrive l'evoluzione completa dell'incidente fino al raggiungimento o meno del danno finale, questa infatti descrive un insieme di eventi che possono contribuire positivamente o negativamente all'evoluzione dell'incidente. Nel caso di corretto intervento dei sistemi di sicurezza, ad esempio, si può parlare di evento che contribuisce positivamente.

Ogni sequenza incidentale risulta basilare per individuare il rischio da considerare, infatti è caratterizzata da una frequenza e il relativo danno ad essa associato. La *frequenza* misura la probabilità che l'evento accada durante uno specifico periodo di tempo stabilito.

Il *danno* è l'effetto ultimo della sequenza incidentale e si distingue in termini di danno provocato alle persone, alla reputazione, alla struttura e all'ambiente.

Il *rischio* è la possibilità che un evento indesiderato accada e dipende dallo scenario incidentale, dalla probabilità che tale scenario accada e dal danno finale associato. Può essere definito come il prodotto tra la frequenza di un certo evento e il danno generato. [5]

$$R = f * D$$

$$\left[ \frac{\text{danno}}{\text{anno}} \right] = \left[ \frac{\text{evento}}{\text{anno}} \right] * \left[ \frac{\text{danno}}{\text{evento}} \right]$$

Nel presente studio con riferimento al settore petrolifero si farà riferimento al rischio inteso come rischio tecnologico e *major* ovvero il rischio che riguarda settori industriali che trattano sostanze pericolose tossiche o infiammabili e che può dar luogo a conseguenze quali esplosioni o incendi. Caratterizzato dunque da bassa probabilità di accadimento ma danni elevati, come si può notare dalla Figura 1.2. [5]

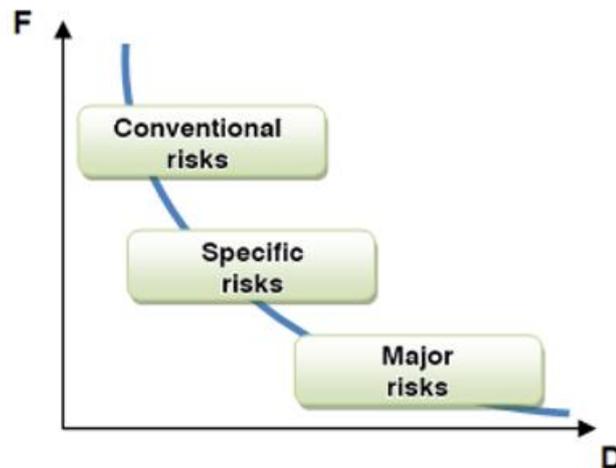


Figura 1.2: Classificazione del rischio [5]

La definizione matematica del rischio pesa allo stesso modo la probabilità di accadimento e il danno associato, ma l'opinione pubblica attribuisce molta più importanza ai danni piuttosto che alla frequenza, quindi in alcune situazioni si utilizza un'equazione molto vicina alla percezione della popolazione.

$$R = f * D^k$$

Dove k è un parametro maggiore di 1 che tiene conto del peso che si vuole dare al danno.

La **valutazione del rischio** è un metodo efficiente per individuare le debolezze in un sistema complesso caratterizzato da sequenze incidentali, quali rilasci incontrollati di grandi quantità di energia che possono dar luogo a esplosioni e incendi o rilasci e dispersione di sostanze tossiche o inquinanti.

Vi sono diverse fasi di analisi del sistema che permettono di identificare i principali aspetti da considerare. La prima fase è prevedere tutti i possibili malfunzionamenti del sistema in modo tale da identificare gli eventi iniziatori e, in seguito allo sviluppo delle possibili sequenze incidentali, l'identificazione delle conseguenze.

Consapevoli delle probabili conseguenze si passa alla valutazione dell'impatto nell'area in cui si trova il sistema, e la valutazione del danno sulle persone, sulla produzione, sull'ambiente e sulla reputazione.

Conoscendo la probabilità di accadimento e le conseguenze, si può procedere alla stima del rischio, la sua tollerabilità e la possibilità di implementare azioni preventive e/o di mitigazione per ridurre il rischio attuale.

Vi sono principalmente due approcci per la valutazione del rischio, come schematizzato in Figura 1.3: l'approccio *qualitativo Q* e quello *quantitativo QRA*. [5]

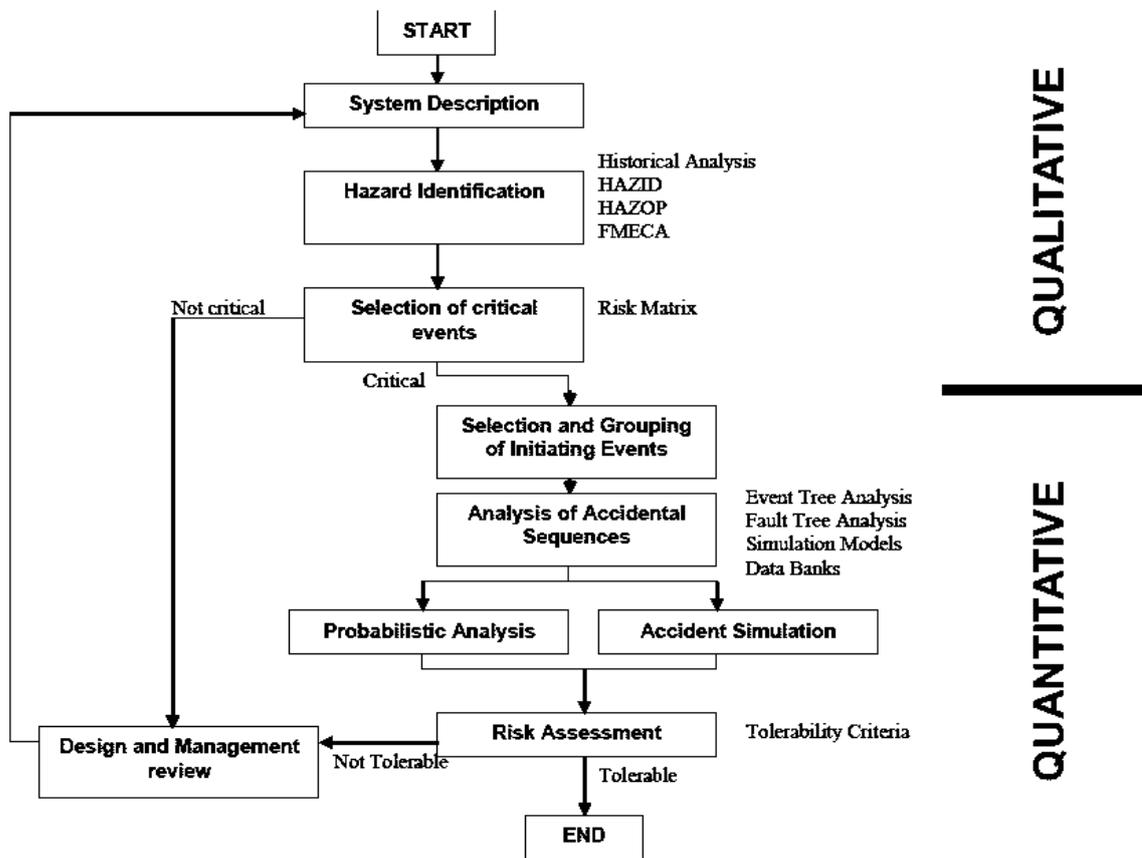


Figura 1.3: Diagramma per la valutazione del rischio [5]

## 1.2.1 Approccio qualitativo

L'approccio qualitativo (Q) è molto veloce, permette di identificare tutte le possibili sorgenti di pericolo, ed associa ad ogni evento indici qualitativi per classificare la frequenza e il danno associato all'evento. Non vi sono dunque dati numerici associati a tale approccio poiché gli **indici** sono solo numeri puri con il ruolo di diversificare gli eventi. Di solito viene applicato per pericoli minori o come preliminare in modo da identificare le rilevanti sequenze incidentali. [5]

La Tabella 1.2 mostra come i numeri sono associati ad una misura qualitativa della probabilità di accadimento dell'evento considerato. Ad esempio, il numero 4 viene associato ad un evento che accade frequentemente.

PROBABILITA'	
Indici	Descrizione
1	Evento non atteso durante la vita dell'impianto
2	Evento atteso al massimo una volta durante la vita dell'impianto
3	Evento atteso poche volte durante la vita dell'impianto, meno di una volta ogni 5 anni
4	Evento frequente, atteso più di una volta ogni 5 anni

*Tabella 1.2: Indici di frequenza*

Tabella 1.3, Tabella 1.4 e Tabella 1.5 associano invece degli indici qualitativi per la valutazione degli effetti, in particolare gli effetti relativi alla sicurezza e salute delle persone coinvolte, all'ambiente in termini di contaminazioni e ad effetti sulla produzione in termini di perdita di produzione.

SICUREZZA E SALUTE	
Indici	Descrizione
1	Nessuna persona colpita
2	Lesioni minori che possono essere curate in meno di una settimana
3	Gravi lesioni che possono essere curate in meno di un mese
4	Lesioni permanenti o morte

*Tabella 1.3: Indici per la sicurezza delle persone*

AMBIENTE	
Indici	Descrizione
1	Nessun impatto sull'ambiente
2	Emissioni e contaminazione trascurabile, equivalente a meno di 100 bbl di olio
3	Emissioni/contaminazioni che richiedono un ripristino ambientale di breve durata (equivalente a 100 fino a 1000 bbls di olio)
4	Emissioni e contaminazioni significanti che possono generare inquinamenti secondari (equivalente a più di 1000 bbls di olio)

*Tabella 1.4: Indici per la sicurezza ambientale*

PRODUZIONE	
Indici	Descrizione
1	Nessun effetto sulla produzione
2	Lieve impatto sulla produzione pari al 30% di produzione giornaliera
3	Perdite significative di produzione, tra il 30% e il 70% di produzione giornaliera
4	Perdite di produzione superiori a circa il 70% di produzione giornaliera o produzione ferma

*Tabella 1.5: Indici per la produzione*

Gli indici qualitativi di danno e frequenza sono raggruppati in una matrice di rischio che implementa criteri di tollerabilità del rischio in modo da determinare se il rischio sia accettabile o meno. Le tabelle di seguito mostrano come il rischio associato ad ogni evento e distinto in termini di produzione (Tabella 1.6), danni alle persone o all'ambiente (Tabella 1.7), può essere accettabile, tollerabile o inaccettabile, come evidenziato dai diversi colori spiegati nella legenda in Tabella 1.8.

Produzione		Frequenza				
		1	2	3	4	5
Danno	1	L	L	L	L	L
	2	L	L	L	M	M
	3	L	L	M	M	M
	4	L	L	M	M	H
	5	L	M	M	H	H

*Tabella 1.6: Matrice di rischio per la produzione*

Persone/Ambiente		Frequenza				
		1	2	3	4	5
Danno	1	L	L	L	L	L
	2	L	L	M	M	M
	3	L	M	M	M	H
	4	L	M	M	H	H
	5	M	M	H	H	H

*Tabella 1.7: Matrice di rischio per le persone e l'ambiente*

Risk level		Index
High	Unacceptable	H
Medium	ALARP	M
Low	Acceptable	L

*Tabella 1.8: Legenda delle matrici di rischio*

I differenti **colori**, come schematizzato dalla Tabella 1.8 rappresentano dunque il livello di rischio. Il colore rosso classifica quegli eventi caratterizzati da elevate probabilità di accadimento ed elevati danni associati, dunque eventi ad elevato rischio e non accettabili. Il colore verde rappresenta eventi caratterizzati da basse probabilità di accadimento e danni associati non elevati dunque con rischio associato accettabile. Il colore giallo rappresenta gli eventi con caratteristiche intermedie il cui rischio può essere ridotto tramite interventi di mitigazione e/o prevenzione (As Low As Reasonably Practicable) purchè che non vi sia una differenza spropositata tra costi e benefici.

## 1.2.2 Approccio quantitativo

L'approccio quantitativo (Quantitative Risk Assessment) è invece più appropriato per rischi gravi e permette una stima numerica del rischio che può essere confrontato con un valore di riferimento per definire se esso sia accettabile o meno. Tale approccio richiede costi più elevati e una maggiore esperienza e tempo.

Partendo da un'analisi qualitativa di solito si raggruppano le sequenze sulla base delle cause che generano simili conseguenze. Dopo aver raggruppano gli eventi, si identifica un evento iniziatore che rappresenta l'evento più rappresentativo del gruppo in termini di pericolosità (eventi con elevato rischio o con poche misure di sicurezza associate).

Dall'analisi quantitativa si selezionano dunque gli eventi iniziatori più critici e per ognuno vengono identificati gli scenari incidentali. Per ogni scenario sono calcolate la frequenza di accadimento e il danno associato. La frequenza è valutata tramite l'analisi probabilistica con l'albero degli eventi e delle cause *Event Tree* e *Fault Tree*, il danno tramite modelli parametrici, modelli CFD o modelli sperimentali in scala. [5]

Una referenza assoluta per la valutazione della tollerabilità del rischio è dunque il *criterio di accettabilità* che tiene conto sia delle frequenze degli scenari che della probabilità che essi si verificano. Tale criterio può essere rappresentato graficamente come mostrato in Figura 1.4 e in Figura 1.5.

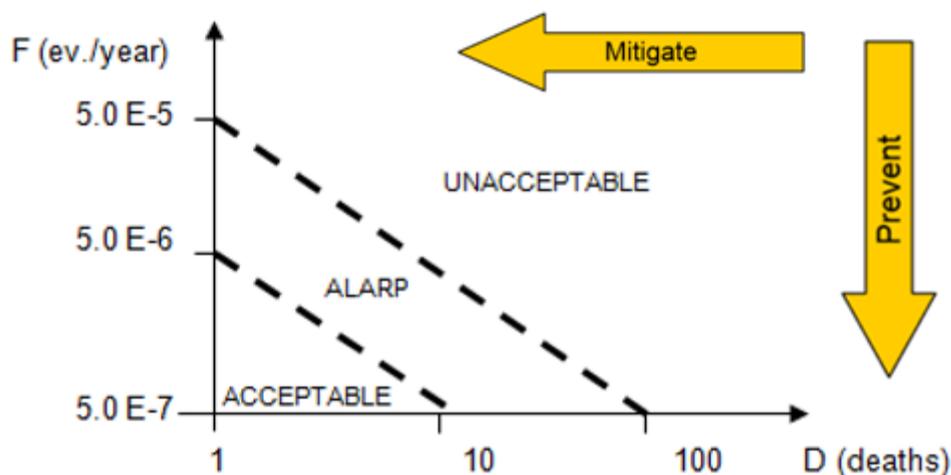


Figura 1.4: Criterio di accettabilità del rischio [5]

La parte centrale racchiude quegli eventi che devono essere mitigati o prevenuti (ALARA o ALARP) almeno che non vi sia una grande differenza tra costi e benefici. [5] Se ulteriori investimenti in termini di mitigazione e prevenzione, come l'aggiunta di ulteriori sistemi di sicurezza o di sistemi ridondanti diversificati, comportano costi molto elevati con trascurabile diminuzione del rischio, non è ragionevole intervenire e il rischio può essere considerato accettabile.

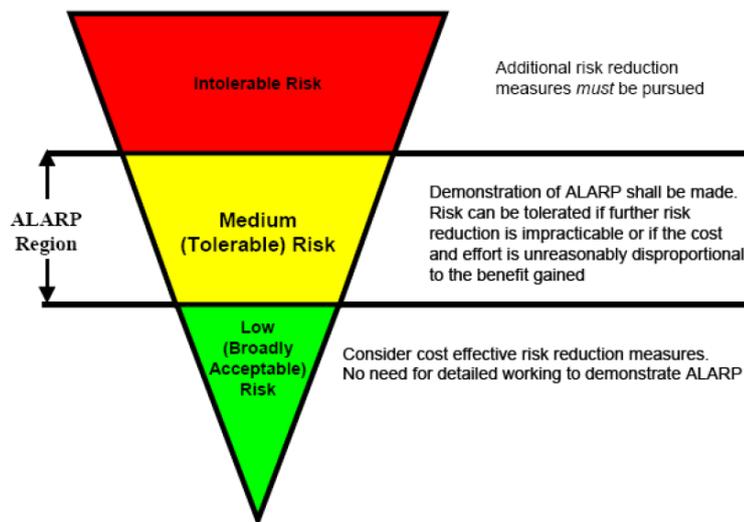


Figura 1.5: Schema della regione ALARP [5]

Un approccio intermedio è l'approccio *semi-quantitativo SQ* che approssima i parametri di danno e di probabilità.

Vi sono dunque in totale tre diversi approcci a seconda dei dettagli con cui si vuole analizzare il problema: l'approccio quantitativo QRA, l'approccio semi-quantitativo SQ, l'approccio quantitativo Q.

La scelta tra i diversi approcci dipende dal livello del rischio e la complessità del problema. Come è possibile verificare dalla Figura 1.6 sottostante, sistemi complessi e con livelli di rischio elevato richiedono un'analisi tramite l'approccio quantitativo QRA, mentre per sistemi più semplici e con bassi livelli di rischio è sufficiente un'analisi tramite l'approccio qualitativo Q.

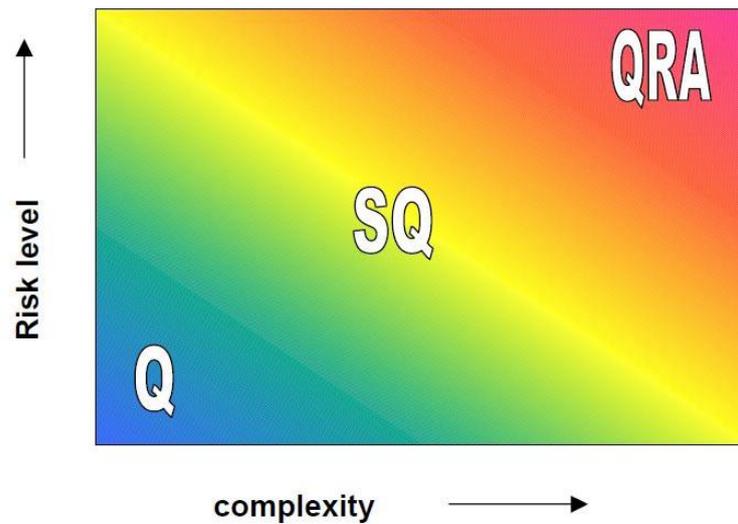


Figura 1.6: Approcci per la valutazione del rischio

### 1.2.3 Analisi delle conseguenze

Nel lavoro di tesi ci si è particolarmente interessati alla valutazione del danno e delle conseguenze delle situazioni incidentali. Si analizzeranno i modelli di fluidodinamica computazionale CFD e i modelli parametrici.

L'analisi delle conseguenze viene svolta guardando le conseguenze relative ad ogni singolo scenario incidentale che dipende da diversi fattori. I principali fattori da monitorare per valutare la severità delle conseguenze sono elencati di seguito. [11]

- Caratteristiche e pericolosità delle sostanze presenti
- Condizioni caratteristiche del rilascio
- Dimensioni del foro di rilascio
- Durata del rilascio e quantità di sostanza rilasciata
- Sistemi di prevenzione e mitigazione presenti nella struttura.

Tale analisi permette di valutare la gravità degli scenari incidentali e del danno e le eventuali misure di mitigazione e/o prevenzione da inserire per migliorarne l'analisi. È fondamentale considerare anche l'area interessata dagli effetti che si possono verificare in base alle dinamiche di rilascio e dispersione quali incendio, esplosioni o rilasci di sostanze tossiche e le condizioni metereologiche che influenzano il raggiungimento di aree che possono essere o meno di interesse.

In base alle condizioni fisiche della sostanza rilasciata e al punto di ignizione vi sono diverse tipologie di incendi [5], [12], come schematizzato in Figura 1.7:

- **Jet-Fire:** Fiamma diffusiva risultante dall'innescò immediato di un getto turbolento. Si verifica quando la sostanza infiammabile è rilasciata da un serbatoio in pressione in fase gassosa e trova immediatamente una quantità di energia tale da innescare la miscela aria-combustibile che si viene a formare.
- **Flash-Fire:** Incendio per innescò ritardato di una nube di vapori. Si verifica quando la sostanza infiammabile rilasciata ha una temperatura di ebollizione inferiore della temperatura ambiente. Dunque, al suo rilascio, in parte evapora e forma una nube di vapori infiammabili che se innescata genera il flash-fire e in parte va a formare una pozza.
- **Pool-Fire:** Fiamma diffusiva sopra la superficie di un liquido. Si verifica quando la sostanza infiammabile rilasciata è in fase liquida e forma una pozza che può essere innescata da una sorgente di energia esterna.
- **Fireball:** Incendio per innescò immediato di una grande quantità di vapori infiammabili. Si verifica quando la sostanza si trova allo stato di gas liquefatto sotto pressione. In seguito al rilascio, di solito a causa di un cedimento, si ha un flash e si forma una nube che si innescò prima di miscelarsi con l'aria dunque si ha la combustione della miscela che via via si consuma e tende ad espandersi. La riduzione della densità della nube fa sì che tende ad andare verso l'alto fino al raggiungere una altezza massima.

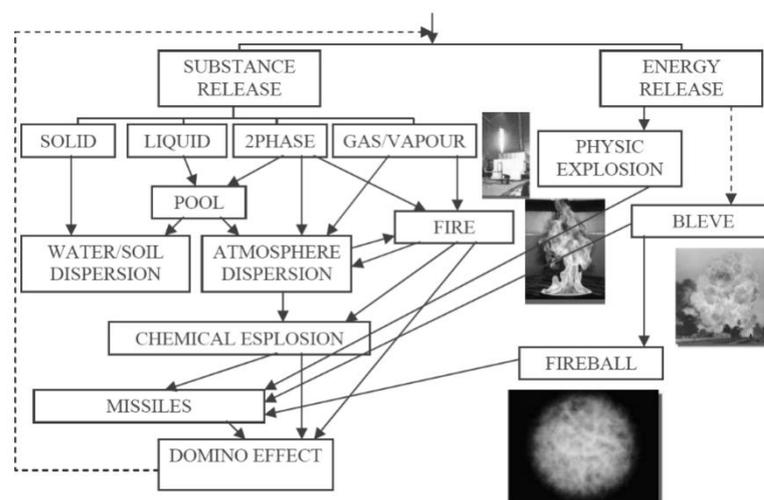


Figura 1.7: Schema dei possibili scenari [13]

Le **esplosioni** sono definite come un rilascio di energia che si propaga sotto forma di onda di pressione. I fenomeni esplosivi sono suddivisi in:

- Esplosioni Fisiche: rilascio rapido di gas o vapore in pressione
- Bleve: si ha la rapida espansione durante la variazione di fase da liquido a vapore di una sostanza in condizioni di liquido surriscaldato
- UVCE: esplosione di nubi di gas infiammabile in ambiente non confinato.

Le conseguenze che possono aver luogo dipendono dunque dallo stato fisico della sostanza rilasciata, dalla quantità di sostanza e dalle condizioni meteorologiche. Una rappresentazione schematica dei differenti possibili scenari è rappresentata in Figura 1.7. Se si ha il rilascio di sostanza solida, polveri possono creare nubi dannose se rilasciate in atmosfera e provocare problemi a livello respiratorio o relativo alla tossicità.

Se si ha rilascio di liquido o bifase si forma una pozza e il materiale infiammabile può generare un pool fire. Un rilascio bifase o di gas/vapore può generare una nube infiammabile che può dar luogo ad un flash fire e la parte rimanente di liquido produrrà una pool fire. Può anche verificarsi un'esplosione insieme al flash fire, in base alla quantità di materiale coinvolto e il grado di confinamento.

Le condizioni meteorologiche e di vento possono favorire la formazione di una nube. Se il materiale rilasciato è in forma di gas o vapore e la velocità di uscita è sufficientemente bassa, si può formare una nube, se la velocità è elevata la nube sarà diluita dall'aria (entrainment) e il rilascio sarà disperso in atmosfera.

Per **dispersione** in atmosfera si intende il fenomeno di trasporto e diluizione in aria di una sostanza gassosa che viene emessa da una sorgente con l'effetto di ridurre la concentrazione che la sostanza ha all'inizio del rilascio. Tale fenomeno dipende dunque da diversi fattori di seguito elencati:

- Caratteristiche chimico-fisiche della sostanza
- Condizioni meteorologiche
- Fenomeni di turbolenza
- Fenomeni gravitazionali

Tali fattori verranno analizzati nei paragrafi successivi per caratterizzare e scegliere tutti i parametri necessari per le impostazioni delle simulazioni.

## 1.3 Piattaforma offshore

Il settore Oil&Gas comprende diverse attività legate all'esplorazione, all'estrazione e alla produzione di petrolio e gas naturale. Inizialmente le attività di perforazione, estrazione e produzione erano localizzate principalmente sulla terraferma ma con lo sviluppo della richiesta mondiale di energia e la ricerca di nuove zone da esplorare l'attività di produzione si è spostata sui fondali marini alla scoperta di nuovi grandi giacimenti di idrocarburi. Gli impianti di produzione in mare sono operativi dalla fine degli anni Sessanta e denominati *impianti offshore*. In Italia il primo impianto di produzione offshore è stato l'impianto Ravenna Mare sito nel mare Adriatico e inizialmente formato da una piccola piattaforma mobile ed una nave di appoggio.

Vi sono diverse attività che possono provocare eventi catastrofici in questo ambiente di lavoro poiché sono luoghi soggetti a condizioni meteorologiche particolari sia dal punto di vista climatico che dal punto di vista marino data la posizione in cui si trovano. Inoltre, tutte le operazioni coinvolgono sostanze liquide facilmente infiammabili ad alta pressione e potenzialmente tossiche in spazi relativamente piccoli, con presenza di numerosi ostacoli.

Vi sono diversi tipi di installazioni offshore che si diversificano dal punto di vista delle operazioni o dal punto di vista della struttura. [14]

Dal punto di vista delle *operazioni* si distinguono in:

- Piattaforme di produzione
- Piattaforme di supporto alla produzione
- Piattaforme non operative

Dal punto di vista della *struttura* si distinguono in:

- Piattaforme con struttura emersa
- Teste di pozzo sottomarine

Gli impianti di perforazione sono strutture impegnate esclusivamente nella perforazione di pozzi, se in seguito all'esplorazione del pozzo si evidenzia la possibilità di sviluppare la produzione si dà avvio alla progettazione delle strutture di produzione dotate anche di tutte le apparecchiature di sicurezza.

Vi sono giacimenti che si trovano in prossimità della costa, in accordo ai limiti dettati dalla legge, e in acque poco profonde, altri a grandi distanze dalla costa e in acque molto profonde. In base alla profondità delle acque si distinguono in strutture galleggianti e strutture fisse.

Una piattaforma di estrazione petrolifera a **struttura fissa** è ancorata al fondale marino grazie ad una **struttura di sostegno** metallica che è in grado di resistere a forti onde e venti. La struttura è composta da **gambe** di acciaio tubolare ancorate direttamente sul fondo del mare che supportano l'intera piattaforma. Tali impianti sono progettati per un utilizzo a lungo termine, grazie alla loro stabilità capace di resistere anche alle più ostili condizioni meteo e marine. Questa tipologia di piattaforma permanente viene utilizzata fino ad una profondità di circa 400 metri di battente d'acqua e non viene utilizzata nel caso di acque molto profonde, soprattutto poiché non è economico costruire gambe di supporto molto alte. [15]

Per profondità comprese tra 300 e 900 metri vengono invece utilizzate le **Compliant Tower** [16]. Sono strutture simili alle tradizionali piattaforme ma con design migliorati rispetto alle piattaforme a struttura fissa per evitare ulteriori costi dovuti alla profondità delle acque e le difficoltà legate all'istallazione. Sono dunque strutture non fisse ma ancorate al fondo del mare tramite una struttura a torre stretta e flessibile in cemento armato o acciaio in grado di supportare un piano per le operazioni di estrazione e produzione. A differenza della struttura fissa, la torre è in grado di contrastare le sollecitazioni del moto ondoso e sopportare elevate forze laterali di onde, vento e correnti.

Le **Tension Leg Platform** (TLP) rientrano nella categoria delle Compliant Structure ma sono invece utilizzate per profondità fino a 1500 metri. Sono costituite da una struttura galleggiante che compensa il peso della piattaforma mantenuta da cavi d'acciaio collocati sul fondale marino e in tensione e in grado di resistere al moto ondoso dando alla piattaforma la stabilità necessaria per condurre le operazioni. Il sistema di ormeggio consente movimenti orizzontali dovuti al moto delle onde, ma non consente movimenti verticali o oscillanti, questo rende le TLP una scelta diffusa per la loro stabilità.



Figura 1.8: Annalisa; Esempio di piattaforma fissa a quattro gambe [14]

Il **corpo** della piattaforma, come nel caso della piattaforma Annalisa mostrata in Figura 1.8, è composto tipicamente da una serie di piani chiamati **deck**, in cui sono installati gli impianti di produzione e perforazione.

Nei vari deck vi sono tutte le apparecchiature necessarie per l'estrazione della miscela e la separazione di acqua, petrolio e gas, come ad esempio: estrattori, separatori, sistemi di pompaggio, separazione e produzione dell'olio, sistema di compressione del gas, sistemi di trattamento dell'acqua, tubi, e tutti i sistemi e componenti aggiuntivi necessari per il controllo dei processi e la sicurezza in termini di protezione e prevenzione, componenti come sensori e sistemi come il Fire Fighting System e il Drain System.

La **testa di pozzo**, mostrata in figura 1.9, è posizionata sulla superficie della piattaforma e dunque del pozzo e fornisce un controllo della pressione durante le operazioni di perforazione. Vi è un dispositivo BlowOut Preventer per evitare uno scoppio del pozzo. Il controllo della pressione superficiale è fornito dal **Christmas Tree** che regola il flusso dei fluidi dal pozzo alle apparecchiature durante la produzione.

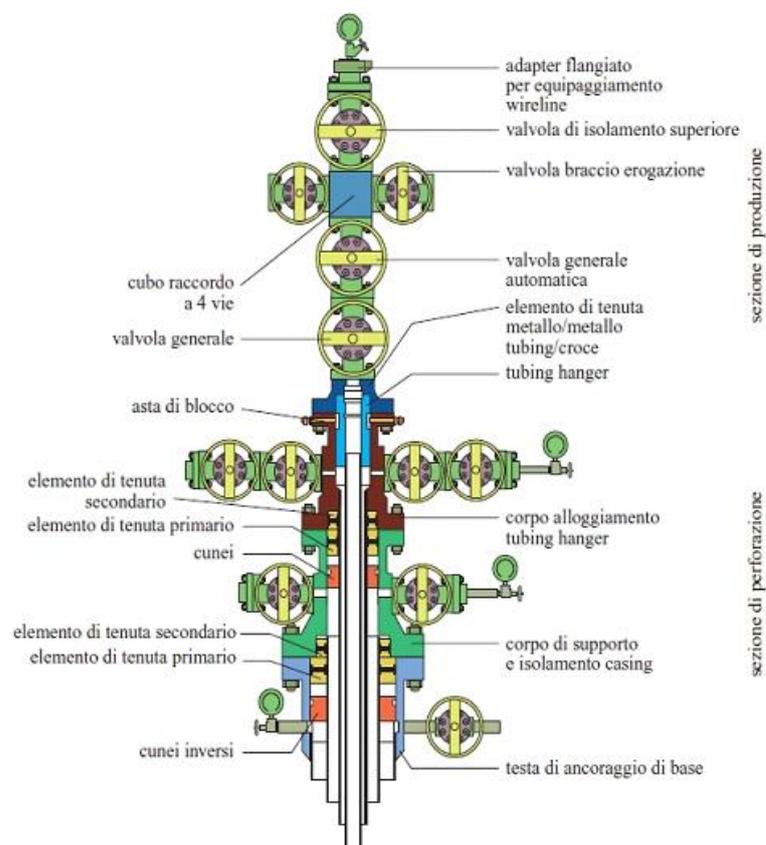


Figura 1.9: Rappresentazione schematica di una testa di pozzo [14]

In una piattaforma offshore il principale veicolo utilizzato per il trasporto delle persone è l'elicottero, anche nelle situazioni di emergenza, e l'helideck è il piano che ne permette l'atterraggio. L'helideck è posto nel piano più in alto della struttura della piattaforma per questioni di facilità di movimento dell'elicottero e di sicurezza [17]. Come si nota dalla Figura 1.10, posti nei piani inferiori all'helideck, vi sono tutti i necessari servizi e alloggi ideati come rifugi temporanei adatti per il pernottamento degli operatori.



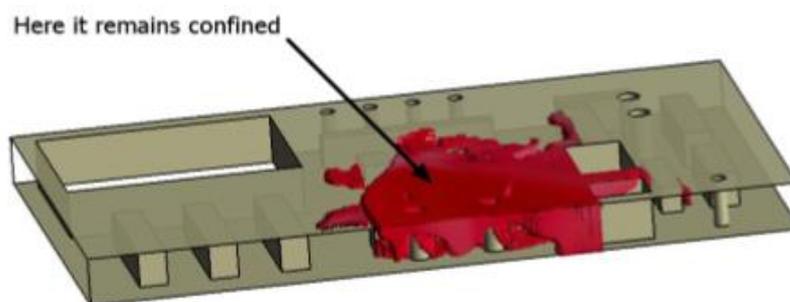
*Figura 1.10: Barbara B; struttura tipica di una piattaforma fissa [14]*

I deck della piattaforma, come si nota nella piattaforma Barbara B in Figura 1.10, sono aperti lateralmente e dunque lambiti dal vento, sono distinti tra loro tramite pavimentazioni che possono essere solidi, *plated* oppure in griglia metallica, *grated*. Questo aspetto risulterà molto importante perché influenza le caratteristiche del fenomeno di dispersione.

Nel primo caso vi è una completa separazione tra i piani che dunque impedisce il passaggio anche di aria, e di sostanza infiammabili in caso di incidente; nel secondo caso vi è una griglia che non separa totalmente i piani ma permette il passaggio di fluidi tra un piano e l'altro. La scelta tra le due dipende dalle tecniche di gestione della sicurezza adottate. In America la scelta ricade sui decks *grated* in modo che la sostanza rilasciata, in caso di evento incidentale, si diluisca più facilmente; in tal caso, però, il volume coinvolto dall'evento incidentale, risulta maggiore, con la crescita conseguente della probabilità di innesco a causa della maggiore presenza di ostacoli (che possono rappresentare potenziali fonti di innesco). In Italia, e in

generale in Europa, la scelta ricade invece spesso sulla scelta della pavimentazione *plated*, non permeabile per le sostanze infiammabili che possono essere presenti, in modo da ridurre il volume coinvolto dalla presenza di gas infiammabile e/o tossico in caso di evento incidentale.

In Italia, come in generale in Europa, la scelta ricade invece spesso sulla scelta della pavimentazione *plated*, non permeabile per le sostanze infiammabili che possono essere presenti, in modo da ridurre il volume coinvolto. La nube di gas infatti resta confinata in un solo piano come si nota dalla Figura 1.11 relativa alle simulazioni svolte in tesi precedenti che trattano lo stesso tema di dispersione in piattaforme Oil&Gas, in [18] e [19].



*Figura 1.11: Esempio di deck plated [19]*

La scelta tra le due tipologie in realtà dipende dalle sostanze presenti all'interno. Se si tratta di piattaforme che trattano solo olio si ha una struttura di tipo grated per evitare che si formino delle pozze all'interno dei deck, nel caso di produzione di gas tale struttura non è richiesta e dunque si ha la geometria più semplice con i piani solidi.

In Italia la maggiorparte delle piattaforme esistenti è finalizzata alla produzione di gas [14], perciò in tale tesi si farà riferimento alla struttura della piattaforma con piani solidi.

### 1.3.1 Sostanze coinvolte e l'offshore in Italia

Per determinare correttamente la valutazione del rischio, è necessario chiarire quali sono le *sostanze pericolose* presenti nell'impianto e le loro caratteristiche fisiche per determinarne la pericolosità.

Le sostanze presenti nella piattaforma sono principalmente idrocarburi, petrolio e gas naturale. Di seguito sono specificate tutte le proprietà delle sostanze in accordo con il Regolamento (EC) 1272/2008 (CLP) [20], con particolare attenzione all'infiammabilità delle sostanze. La conoscenza di queste informazioni è fondamentale per i lavoratori, in modo da trattare correttamente le sostanze e garantire la sicurezza delle operazioni all'interno dell'impianto.

Di seguito nella Figura 1.12 e Figura 1.13 sono riportati alcuni aspetti importanti delle principali sostanze presenti.

Nelle simulazioni si considera come sostanza rilasciata il *gas naturale* nella sua maggiore concentrazione, ovvero il CH<sub>4</sub>. In particolare, uno dei dati fondamentali da considerare nelle simulazioni di dispersione è l'intervallo di infiammabilità entro cui la miscela di combustibile e aria può bruciare e autosostenersi ad una data temperatura e pressione, delimitato dai *limiti di infiammabilità*:

- Low Flammability Limit 5% (vol.)
- Upper Flammability Limit 15% (vol.)

Nel presente lavoro di tesi si prende in considerazione come sostanza il gas naturale ed in particolare il *metano* che presente in concentrazione più elevata.

Il *parametro-chiave* analizzato è la concentrazione da confrontare con i limiti di infiammabilità piuttosto che la tossicità. Infatti, qualora ci si collocasse nel range di infiammabilità della sostanza, si creerebbero le condizioni idonee alla generazione di incendi ed esplosioni; questi rappresentano gli scenari di interesse da prevenire e nei casi peggiori mitigare.

**Labeling according to Regulation (EC) No 1272/2008**

Hazard pictograms :



Signal Words : Danger

CLP Hazard Statements : PHYSICAL HAZARDS:  
H224: Extremely flammable liquid and vapour.

ENVIRONMENTAL HAZARDS:  
H411: Toxic to aquatic life with long lasting effects.

## Crude Oil

HEALTH HAZARDS:  
H350: May cause cancer.  
H304: May be fatal if swallowed and enters airways.  
H319: Causes serious eye irritation.  
H336: May cause drowsiness or dizziness.  
Central nervous system (CNS).  
H373: May cause damage to organs or organ systems through prolonged or repeated exposure.  
Liver.  
Thymus.  
EUH066: Repeated exposure may cause skin dryness or cracking.

### SECTION 9. PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES

#### 9.1 Information on basic physical and chemical properties

Appearance	: Brown to black. Viscous liquid.
Odour	: Potential smell of rotten eggs and sulphur..
pH	: Not applicable
Initial Boiling Point and Boiling Range	: 10 - 400 °C / 50 - 752 °F
Freezing Point	: Data not available
Flash point	: < 23 °C / 73 °F
Upper / lower Flammability or Explosion limits	: 0.6 - 8 %(V)
Auto-ignition temperature	: > 220 °C / 428 °F
Vapour pressure	: Data not available
Relative Density	: Data not available
Density	: < 1.010 g/cm3 at 15 °C / 59 °F
Water solubility	: Insoluble.
Solubility in other solvents	: Data not available
n-octanol/water partition coefficient (log Pow)	: 2 - 6
Kinematic viscosity	: 3 - 1,000 mm2/s at 40 °C / 104 °F
Vapour density (air=1)	: Data not available
Decomposition Temperature	: Data not available
Flammability	: Flammable liquids
Oxidizing Properties	: Not applicable.
Explosive Properties	: Not classified

*Figura 1.12: proprietà fisiche e chimiche del petrolio*





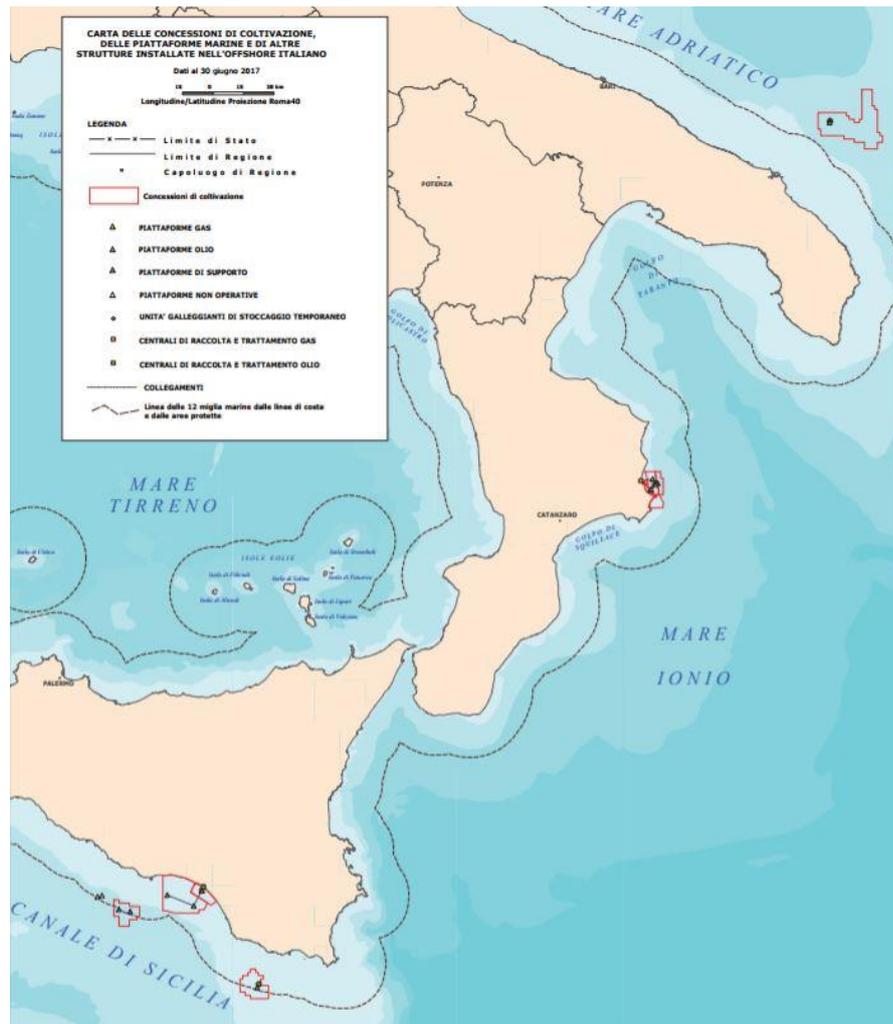
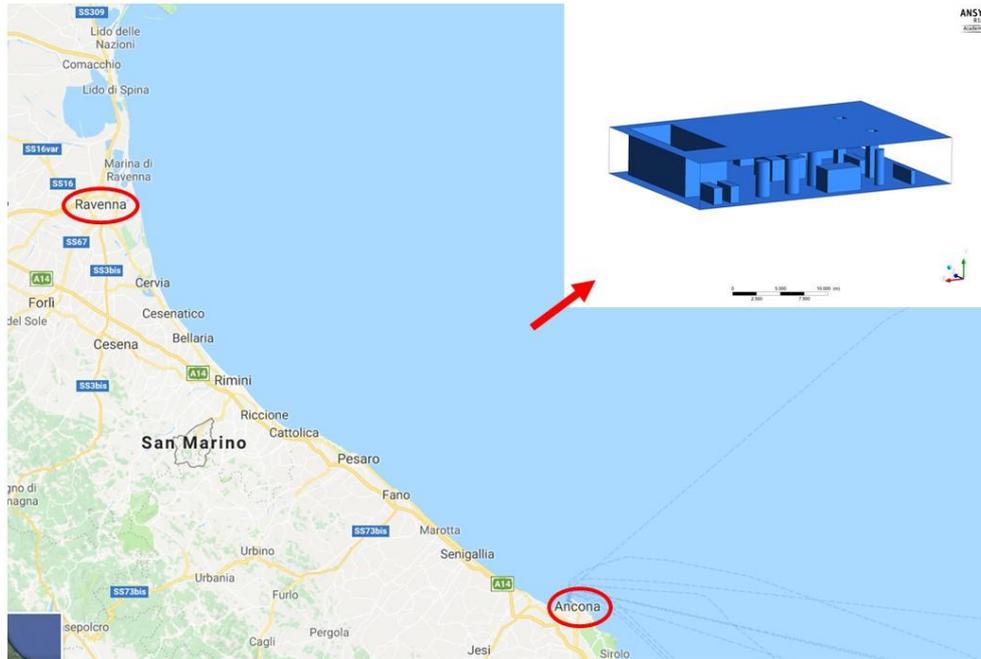


Figura 1.15: Carta Basso Adriatico, Ionio e Canale di Sicilia [14]

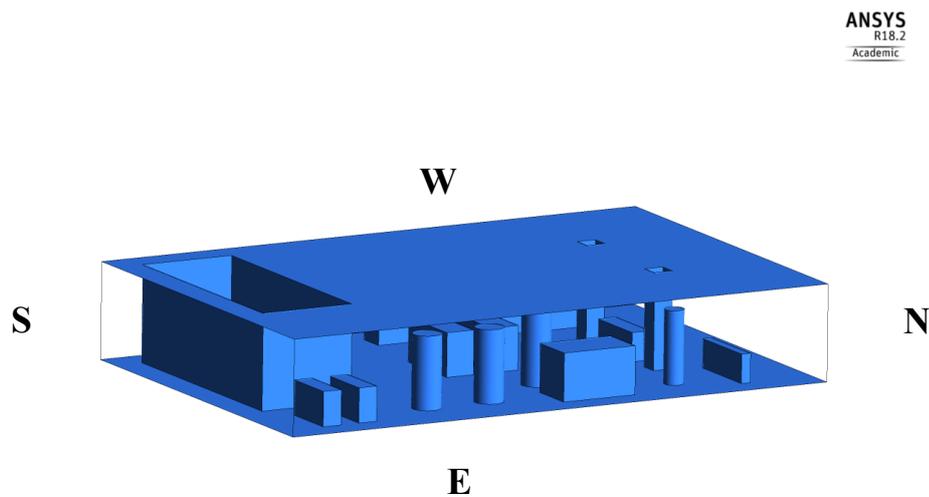
La **piattaforma utilizzata** come dominio di calcolo nelle simulazioni è stata localizzata dunque nelle acque poco profonde del Mar Adriatico. Dato che la maggiorparte delle strutture nel territorio italiano sono strutture emerse, è stata scelta una piattaforma di produzione con struttura emersa avente tre decks, di cui il deck centrale è quello di produzione, che verrà descritto e analizzato dettagliatamente in seguito. I decks sono stati scelti come **plated**. La scelta del posizionamento della piattaforma è uno step fondamentale per determinarne le condizioni metereologiche, dunque di vento che saranno parametri fondamentali per le analisi di dispersione.

La piattaforma è stata **localizzata**, come rappresentato in figura 1.16, a largo delle stazioni meteorologiche poste a Ravenna Punta Marina e Ancona Boa a cui si farà riferimento in 4.3 per la scelta delle condizioni meteorologiche.



*Figura 1.16: Localizzazione Piattaforma*

Il lato corto della piattaforma, come si può notare dal deck rappresentato in Figura 1.17, è esposto a nord.



*Figura 1.17: Orientamento Piattaforma*

## 1.4 Fluidodinamica computazionale

Le simulazioni di rilascio e dispersione giocano un ruolo importante nella valutazione del rischio, perché permettono di analizzare e prevedere le possibili conseguenze di eventi incidentali.

Per lo studio della dispersione di un gas, nel nostro caso il metano, in un ambiente geometricamente complesso e con la presenza di numerosi ostacoli, quale l'ambiente della piattaforma, è opportuno fare affidamento ai codici di fluidodinamica computazionale. Tali codici sono un valido strumento per la modellazione di eventi incidentali e permettono di studiare fenomeni complessi e pericolosi in modo sicuro. L'obiettivo è ottenere un metodo matematico per riprodurre un modello che riesca a fornire buoni risultati in tempi e costi computazionali accettabili.

La **fluidodinamica computazionale** (Computational Fluid Dynamics, CFD) è una branca della meccanica dei fluidi che utilizza analisi numerica ed algoritmi per analizzare e risolvere problemi legati al movimento di fluidi in sistemi confinati o in campo aperto. È uno strumento di simulazione numerica ampiamente utilizzato in differenti ambiti come strumento di ricerca sia a livello accademico che industriale. [21]

In ambito industriale, l'uso delle CFD è molto legato all'impiego di programmi di calcolo e lavora sulla base delle equazioni discrete di Navier-Stokes, accoppiate ad algoritmi per ottenere soluzioni iterative.

Il sistema di equazioni di **Navier-Stokes**, formato partire dalle equazioni di conservazione della massa, della quantità di moto e dell'energia, è un sistema di equazioni differenziali non lineari alle differenze finite che non è possibile risolvere con un approccio analitico. Tale sistema deve essere discretizzato sostituendo tali equazioni differenziali alle loro equivalenti in forma algebrica. Definita la geometria del problema da analizzare, il volume interessato viene suddiviso in un numero di celle elementari che costituiscono la griglia di calcolo.

Si distinguono tre diversi **metodi di discretizzazione** del dominio del fluido, che saranno descritti in seguito in 1.4.2: metodo delle differenze finite, metodo agli elementi finiti e ai volumi finiti.

La risoluzione richiede un **approccio numerico** che deve essere risolto in maniera iterativa all'interno del dominio spaziale definito e formato dall'insieme di punti discreti presenti nella griglia di calcolo, corrispondente alla regione in cui è presente il fluido. La definizione della griglia di calcolo computazionale è molto importante perché ha un forte impatto sulla precisione. La **stabilità** della soluzione dipende da due elementi fondamentali:

- La precisione
- La definizione della griglia di calcolo

Vi sono diversi software che permettono analisi CFD, tuttavia l'utilizzo di questi software non è immediato e bisogna fare attenzione al fine di ottenere risultati precisi, accurati e fisicamente significativi per ogni problema considerato. La conoscenza di base del software e del modello numerico che viene utilizzato risulta perciò fondamentale.

Si deve fare attenzione anche alla scelta dei parametri e delle opzioni corrette per il modello numerico perchè le scelte effettuate hanno un forte impatto sui risultati. Una delle principali sfide della simulazione CFD è quella di scegliere i modelli numerici più adatti che spiegano accuratamente la turbolenza del flusso senza utilizzare troppe risorse computazionali, questi verranno trattati in 1.4.4.

La fluidodinamica computazionale è stata introdotta nell'analisi del rischio per la valutazione delle conseguenze delle sequenze incidentali nelle piattaforme Oil&gas offshore e per migliorare la qualità dei risultati delle simulazioni di rilascio e dispersione, ma richiede un costo computazionale molto elevato dovuto all'applicazione delle equazioni di Navier-Stokes a domini vasti. Si cerca, dunque, di trovare delle soluzioni in termini di approcci utilizzati per ridurre il tempo di calcolo in modo tale da ridurre il tempo richiesto per evitare di rallentare la fase di progettazione.

Ogni simulazione è costituita da tre *fasi* [21], schematizzate in Figura 1.18 e descritte nei seguenti paragrafi:

- Pre-processing
- Fase di calcolo
- Post-processing.

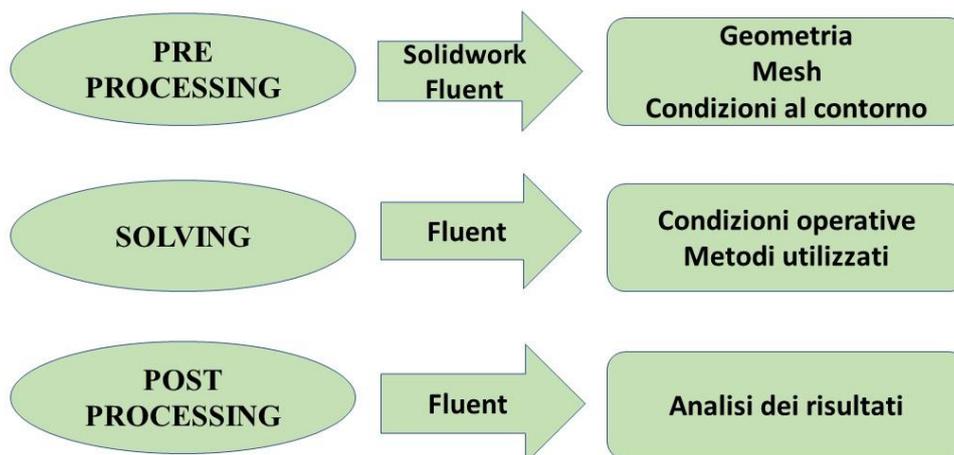


Figura 1.18: Fasi delle simulazioni

## 1.4.1 Pre-processing

Il pre-processing è la prima fase della simulazione e prevede la costruzione della geometria, la definizione del dominio computazionale, le proprietà dei fluidi e dei fenomeni fisici coinvolti, la creazione della mesh e la definizione delle condizioni al contorno [21].

Le equazioni del moto dei fluidi sono applicate ad ogni punto dello spazio chiamato **nodo** presente all'interno della mesh. Per **mesh** o griglia si intende l'insieme di facce, spigoli e vertici che caratterizzano un oggetto dunque identifica le celle o gli elementi in cui risolverle equazioni di conservazione. Con la suddivisione del volume di calcolo in elementi infinitesimi chiamati **celle**, Figura 1.19, si ha una rappresentazione discreta della geometria e del problema con un numero di nodi limitato e dunque si ha un'approssimazione di un fenomeno continuo nello spazio applicato ad un numero limitato di punti.

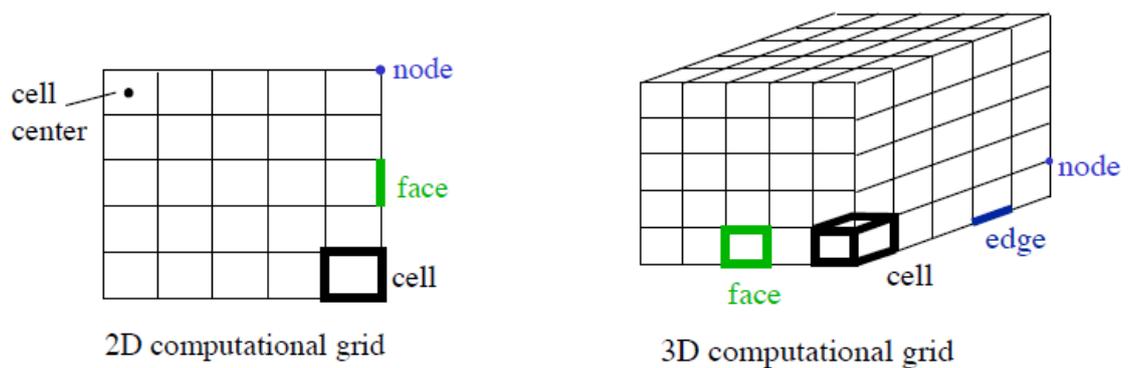


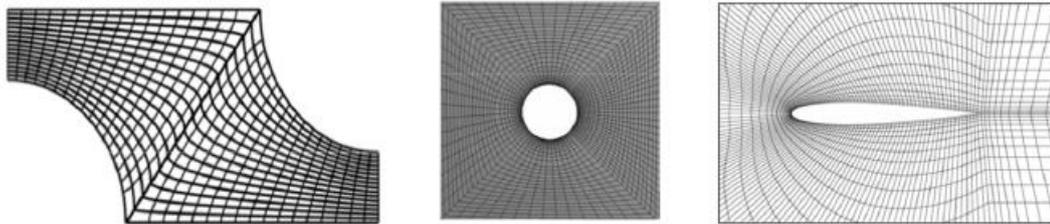
Figura 1.19: Griglie computazionali [22]

La definizione della mesh è fondamentale, poiché, più è alto il numero di nodi, più ci si avvicina ad una descrizione continua dello spazio, in modo tale da avere una soluzione più accurata riducendo gli errori di approssimazione. La dimensione delle celle può variare molto da una zona all'altra del dominio in funzione dell'accuratezza richiesta. All'aumentare della mesh però aumenta il costo computazionale poiché aumenta il tempo di calcolo ma aumenta l'accuratezza della soluzione e la velocità di convergenza. È dunque fondamentale trovare un **compromesso** nella definizione della mesh; il giusto compromesso sarà valutato e validato successivamente con l'analisi di grid independence in 4.5.

Esistono diverse tipologie di **griglia di calcolo** (mesh) [23] :

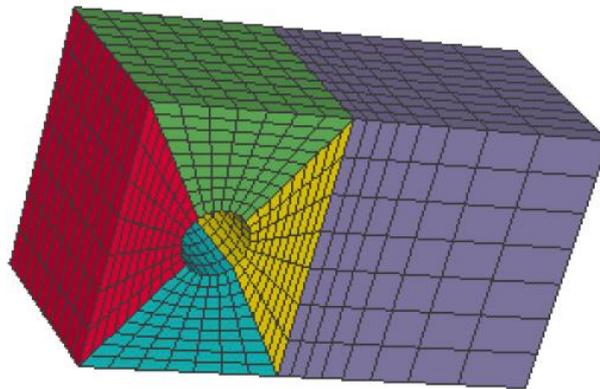
- Strutturata
- Non strutturata
- Ibrida

La griglia **strutturata**, Figura 1.20, è regolare ed è caratterizzata da elementi di forma rettangolare o quadrangolare per geometrie bidimensionali e da prismi o esaedri per quelle tridimensionali. I nodi sono punti di intersezione tra linee griglia parallele che devono attraversare tutto il dominio e intersecano famiglie di linee differenti una sola volta. Tale griglia può essere utilizzata solo per geometrie semplici e non garantisce l'uniformità della distribuzione delle celle.



*Figura 1.20: Esempi di griglia strutturata*

Vi è anche la possibilità di costruire griglie strutturate multiblocco, Figura 1.21, dove ogni blocco può essere connesso in modo arbitrario. Tali griglie sono più flessibili delle griglie strutturate a singolo blocco, ma presentano delle limitazioni dovute al maggiore tempo computazionale richiesto per la creazione manuale dei strutture multi-blocchi rispetto alla griglia non-strutturata.



*Figura 1.21: Esempio di griglia strutturata multiblocco [24]*

La griglia **non-strutturata**, Figura 1.22, è caratterizzata da elementi triangolari o quadrangolari per geometrie bidimensionali e da tetraedri o esaedri per quelle tridimensionali.

Tale griglia può essere utilizzata anche per geometrie complesse e flessibili e permette di infittire facilmente le zone di maggiore interesse, ma richiede maggiore memoria e tempo di calcolo a causa del fatto che la struttura non è regolare.

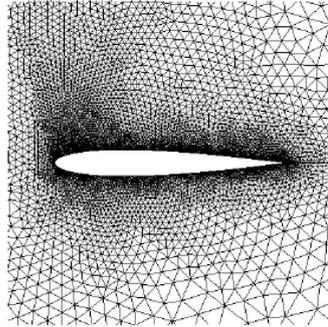


Figura 1.22: Esempio di griglia non strutturata [24]

La **griglia ibrida** è formata dalla combinazione di una griglia strutturata ed una non strutturata, dunque con tipi di celle diverse a seconda della necessità. Lo svantaggio è il tempo richiesto che risulta maggiore dei precedenti. In generale solo le mesh non strutturate possono essere ibride.

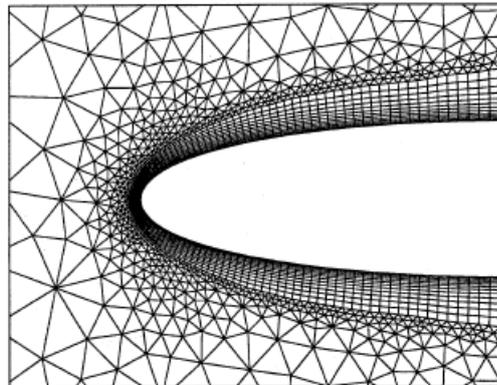


Figura 1.23: Esempio di griglia ibrida

Nel presente lavoro di tesi si è scelta una griglia di calcolo di tipo **non strutturata** tetraedrica per infittire meglio le zone di maggiore interesse. Le celle della griglia di calcolo hanno dunque dimensioni diverse in base alla zona considerata. Il passaggio tra zone più fitte a zone meno fitte avviene in maniera **graduale**.

## 1.4.2 Solving

La fase di calcolo prevede la scelta delle sostanze impiegate, l'impiego delle condizioni al contorno e le condizioni operative e i metodi da utilizzare [21]. Consiste nel discretizzare le equazioni di trasporto sulla mesh per poi risolverle. In tale fase si prevede la risoluzione vera e propria delle equazioni.

**Discretizzare** significa sostituire le equazioni differenziali con le loro equivalenti in forma algebrica che derivano dalla discretizzazione del volume di controllo. La discretizzazione del volume di controllo è la suddivisione in piccoli domini spaziali o temporali in modo da avere risultati discreti nello spazio e nel tempo. Queste possono essere risolte tramite un computer. [23]

Vi sono tre metodi di discretizzazione, [21]:

- **Metodo delle differenze finite:** è il metodo più semplice. Le derivate sono sostituite con il loro rapporto incrementale. I termini differenziali dunque diventano algebrici.
- **Metodo degli elementi finiti:** si suddivide il volume in elementi finiti a cui si approssima la soluzione con una combinazione lineare di funzioni.
- **Metodo dei volumi finiti:** è il metodo più utilizzato in CFD. È basato sull'integrazione delle equazioni differenziali alle derivate parziali in un volume di controllo, sulle superfici del quale sono imposte le condizioni al contorno.

Il volume di controllo viene suddiviso in volumetti elementari che comportano dunque un'approssimazione e di conseguenza un errore.

Nel presente lavoro di tesi il solver utilizzato, **Ansys Fluent 18.2**, risolve le equazioni fluidodinamiche utilizzando il metodo dei volumi finiti. Il software Ansys Fluent è un potente strumento di fluidodinamica computazionale che permette di modellare fisicamente e fornisce risultati rapidi e accurati in un'ampia gamma di applicazioni CFD. È uno dei software leader di mercato in ambito fluidodinamico. [25]

Le condizioni al contorno sono applicate sulle superfici del volume di controllo e specificano i valori che una variabile deve assumere al contorno del dominio. L'imposizione delle condizioni al contorno ad un'equazione differenziale è necessaria per determinare una delle infinite soluzioni possibili. [23]

Nelle simulazioni CFD le possibili condizioni al contorno sono:

- **Velocity inlet:** utilizzata per definire la superficie di ingresso di un fluido nel dominio di calcolo inserendo valori del modulo e direzione della velocità.
- **Mass flow Inlet:** utilizzata per definire la superficie di ingresso di un fluido nel dominio di calcolo inserendo i valori di portata della sostanza o composizione della miscela e direzione in cui fluisce.

- **Pressure outlet:** utilizzata per definire la superficie da cui fuoriesce un fluido dall'interno del dominio inserendo il valore della pressione in uscita.
- **Wall:** utilizzata per le superfici solide che non possono essere oltrepassate dal fluido.
- **Internal:** utilizzata per quelle superfici che si trovano all'interno del dominio del fluido ma non hanno alcuna incidenza sulla fisica del problema.
- **Symmetry:** utilizzata nel caso di simmetria imponendo le componenti della velocità perpendicolari alla superficie.

### 1.4.3 Post-processing

Il post-processing è l'ultima fase della simulazione CFD; è effettuato dopo la risoluzione delle equazioni e permette di visualizzare e analizzare i risultati ottenuti. Si può effettuare dunque la visualizzazione e l'analisi dei dati ottenuti e l'interpretazione di tali risultati. Tramite tale fase si possono estrarre tutte le informazioni come i grafici tridimensionali, contorni bidimensionali, grafici e linee di corrente delle grandezze di interesse.

### 1.4.4 Turbolenza

Il principale utilizzo della CFD è quello di risolvere le equazioni di Navier-Stokes e le equazioni ad esse collegate. La risoluzione analitica di tali equazioni può avvenire solamente in casi con geometrie semplici e con flussi laminari in cui eventuali piccole perturbazioni tendono a smorzarsi. Il moto di un fluido può essere laminare o turbolento. Il moto è definito **laminare** quando le particelle di fluido scorrono le une sulle altre senza miscelarsi, è governato dalle forze viscosse mentre le forze di inerzia sono trascurabili dunque è un moto stazionario. [26]

La maggior parte dei flussi che si incontrano nei casi reali di interesse sono di natura **turbolenta**. Nel moto turbolento le forze di inerzia riescono a sovrastare le forze viscosse e l'aumento di velocità e le fluttuazioni delle pressioni rendono il moto tridimensionale.

In regime turbolento le piccole perturbazioni tendono a intensificarsi e portano il movimento del fluido a cambiare continuamente direzione. Si creano dei vortici che sono la causa principale di una forte miscelazione tra le specie presenti. [23] Il fenomeno turbolento risulta essere molto complicato e difficile anche da definire infatti il movimento del fluido in tale regime è molto complesso.

La turbolenza è un fenomeno **non lineare, tridimensionale e dipendente dal tempo** [27]. Il movimento del fluido nelle tre dimensioni è descritto da un sistema di equazioni differenziali che rappresentano le leggi di conservazione della fisica (conservazione della massa, del momento, dell'energia e della concentrazione).

Per discriminare le due tipologie di regime fluidodinamico è utile il **numero di Reynolds**.

Il numero di Reynolds è una grandezza adimensionale, può essere definito come il rapporto tra le forze d'inerzia e le forze viscosive:

$$R_e = \frac{\rho v d}{\eta}$$

dove  $\rho$  indica la densità del fluido [ $kg/m^3$ ],  $v$  la velocità [ $m/s$ ],  $d$  il diametro del condotto in cui fluisce il fluido [ $m$ ], e  $\eta$  la viscosità dinamica del fluido [ $kg/(ms)$ ].

Tale valore permette di valutare dunque se il flusso, in seguito all'impatto con un ostacolo, è in regime laminare o turbolento. Il valore di transizione dei due moti è pari a  $2 * 10^5$ , dunque il moto risulta laminare nel caso di valori di tale parametro al di sotto del valore di transizione e turbolento nel caso contrario.

Le soluzioni di problemi di flussi turbolenti si possono raggiungere tramite diversi approcci analitici o numerici con diversi livelli di accuratezza. La risoluzione delle equazioni applicate a casi reali richiede necessariamente un approccio numerico.

Vi sono diversi modelli di risoluzione [23] tra cui i principali sono: il modello DNS (*Direct Numerical Simulation*) ed i modelli LES (*Large Eddy Simulation*) e RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*).

Il modello **Direct Numerical Simulation (DNS)** è l'approccio più semplice. Risolve in maniera esplicita le equazioni simulando i flussi turbolenti con elevata accuratezza nei risultati ottenuti [28]. È la soluzione numerica delle equazioni di bilancio di Navier-Stokes dipendenti dal tempo senza utilizzo di alcuna semplificazione dunque senza l'utilizzo di modelli turbolenti. L'assenza del modello di turbolenza implica che la simulazione si ottiene risolvendo numericamente tutte le scale spaziali e temporali di turbolenza, e dunque ha la migliore precisione come metodo. Tuttavia, richiede un elevato costo computazionale ed economico poiché richiede l'utilizzo di un computer con elevate caratteristiche. Tale modello oggi si utilizza solamente in ambito di ricerca e accademico.

Il modello **Large Eddy Simulation (LES)** calcola numericamente le strutture più grandi di una dimensione scelta come caratteristica e quelle inferiori sono invece modellate con i modelli di turbolenza. Si ha dunque la descrizione diretta del moto dei grandi vortici che compongono la turbolenza. Il costo computazionale è notevolmente ridotto rispetto al precedente ma più elevato rispetto al modello RANS.

Il modello **Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)** considera le proprietà istantanee del flusso di un regime turbolento come pressione e velocità decomposte nella componente media e fluttuante con il tempo. Si ottiene dunque un sistema di equazioni alle derivate parziali semplificate. Descrive dunque il flusso medio. Tale modello ha dunque un basso costo computazionale ma rispetto ai modelli DNS e LES ha minore accuratezza e richiede modelli

di turbolenza per la risoluzione del problema. Il tempo richiesto da un modello RANS, come dimostrato in [29], è un decimo rispetto al tempo richiesto dalle simulazioni LES e DES. Grazie al basso costo computazionale e la sua semplicità e robustezza è il modello più utilizzato nei modelli trattati simili al nostro caso studio.

Vi sono differenti modelli di turbolenza *RANS*, [23], che sono disponibili in software commerciali CFD:

- Modello ad una sola equazione
- Modello a due equazioni

Il modello con una singola equazione è caratterizzato da un'unica equazione di trasporto addizionale, cioè da aggiungere alle equazioni di Navier-Stokes per la chiusura del problema, solitamente per il calcolo dell'energia cinetica di turbolenza  $k$ .

I modelli a due equazioni utilizzano, in aggiunta alle equazioni di Navier-Stokes, due equazioni di trasporto per calcolare due proprietà della turbolenza, solitamente la prima proprietà è sempre l'energia cinetica turbolenta  $k$ , la seconda varia. Alcuni tra i modelli più utilizzati per molti tipo di problemi di ingegneria sono il  $k-\epsilon$  e il  $k-\omega$ , dove rispettivamente la seconda proprietà è rateo di dissipazione dell'energia cinetica turbolenta ( $\epsilon$ ) e il rateo di dissipazione specifico ( $\omega$ ).

Il **modello  $k-\epsilon$**  è molto diffuso e ampiamente testato. È un modello semi-empirico che utilizza le equazioni differenziali di trasporto dell'energia cinetica turbolenta ( $k$ ) e del suo rateo di dissipazione ( $\epsilon$ ). Il flusso è considerato totalmente turbolento e la viscosità molecolare è trascurata.

Il **modello  $k-\omega$**  utilizza le equazioni differenziali di trasporto dell'energia cinetica turbolenta ( $k$ ) e la velocità di dissipazione specifica ( $\omega$ ). Anch'esso ampiamente testato ed utilizzato, è stato proposto da Kolmogorov e ampiamente sviluppato da Wilcox [26] per migliorarne l'accuratezza e l'affidabilità. Il modello  $k-\omega$  al fine di tale tesi risulta dunque migliore del modello  $k-\epsilon$  perché raggiunge una maggiore precisione per gli strati limite con gradienti di pressione. [26]

Un modello più vantaggioso è il **modello  $k-\omega$  SST** che è un modello ibrido tra  $k-\epsilon$  e  $k-\omega$ . Questo modello combina i vantaggi dei due modelli di cui è composto, infatti nel caso di analisi in zone lontane dall'ostacolo si utilizza il  $k-\epsilon$  e il  $k-\omega$  nell'intorno dell'ostacolo.

Per la scelta del metodo e del modello appropriato da utilizzare è importante avere un ampio background. Vi sono differenze tra i modelli di turbolenza derivanti dalle semplificazioni e assunzioni di modellazione. È importante utilizzare modello numerico migliore, cioè quello che prende in considerazione con accuratezza il flusso di turbolenza con un costo computazionale contenuto. A seguito di un'analisi bibliografica [19], è stato dunque scelto il modello  $k-\omega$  SST.

## 2. Stato dell'arte

Nel presente lavoro di tesi si è preso in considerazione il fenomeno di rilascio di metano ad alta pressione e in particolare la sua dispersione nella piattaforma. I fenomeni coinvolti sono complessi ed è perciò necessario un confronto con la letteratura per comprendere come sono stati trattati e modellati fenomeni simili in passato.

L'applicazione di questi modelli e strumenti è molto rara nell'ambiente Oil&Gas offshore. Nel caso generale di perdita da un serbatoio o di rottura di un serbatoio o di una tubazione, si deve modellare inizialmente un fenomeno di rilascio con delle condizioni di getto supersonico sotto espanso (che deve essere trattato come compressibile), in seguito, lontano dal punto di rilascio, la miscela di aria e metano può essere approssimata ad un gas ideale (incomprimibile).

### 2.1 Analisi dei diversi approcci

Il fenomeno analizzato in questi tipi di incidenti è estremamente complesso perché si tratta del rilascio di gas in pressione. Il gas rilasciato si trova inizialmente in condizioni di efflusso sonico compressibile, come schematizzato in Figura 2.1, [19].

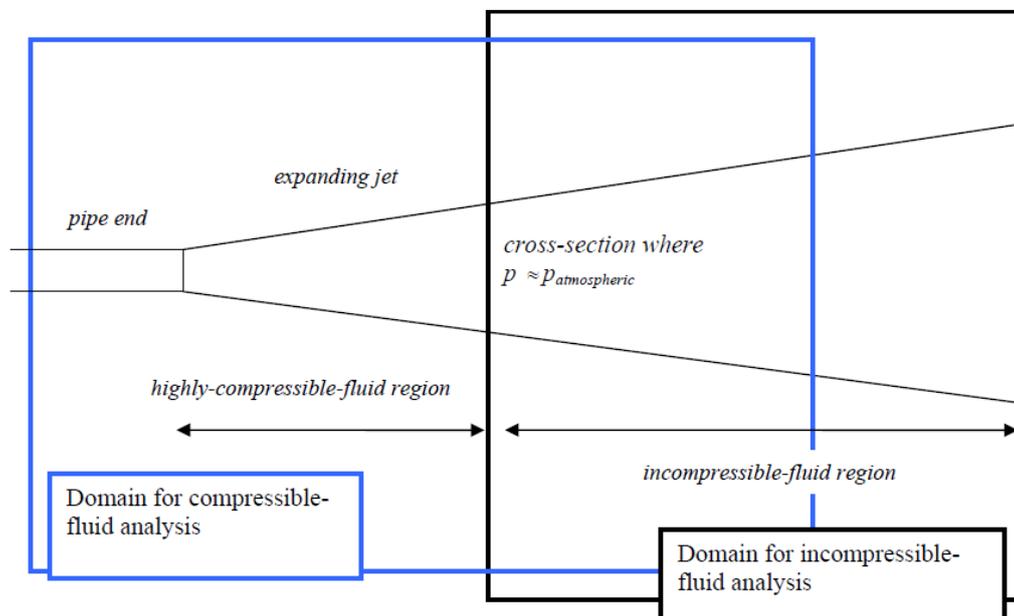


Figura 2.1: Struttura di un getto

Nella letteratura si trovano analisi con diversi **approcci**, come rappresentato in figura e descritto in [19] e [18]. Tali approcci sono descritti di seguito in modo tale da ricavare le informazioni che possono essere considerate come informazioni di input per questa tesi. Vi sono prevalentemente due approcci che si differenziano tra loro per il numero di steps di cui si compone la simulazione: approccio a singolo step e approccio a due steps.

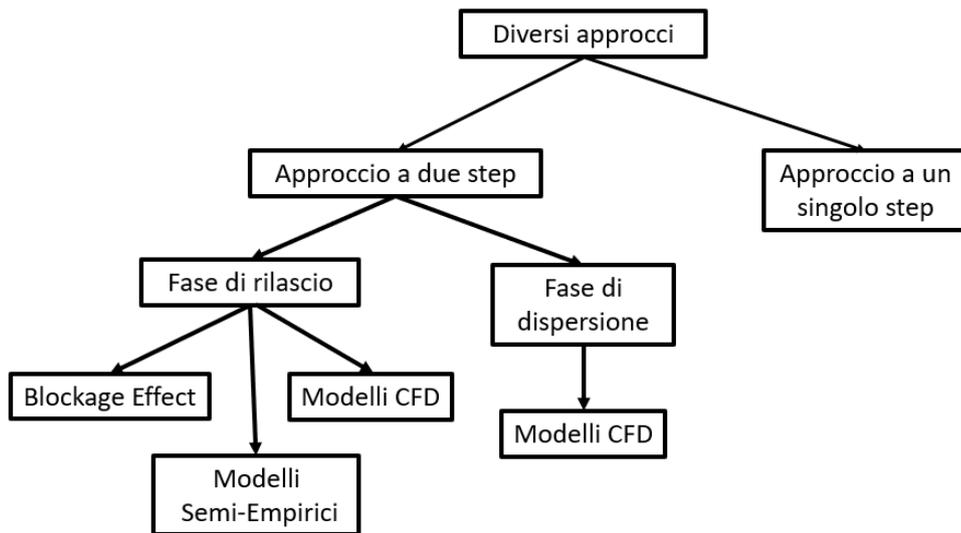


Figura 2.2: Possibili approcci [19] [18]

L'approccio ad un **singolo step**, utilizzato in [30] tratta l'intero problema di rilascio e dispersione con una sola simulazione. Tale approccio ha un elevato costo computazionale perché richiede time steps molto piccoli. Nel caso in esame in tale tesi non è dunque idoneo perché si hanno dei parametri che variano in range spaziali molto grandi. Se si vuol fare un esempio, la pressione nella fase di rilascio varia molto velocemente ed in spazi molto ridotti mentre nel caso di dispersione si ha una variazione molto più lenta nello spazio.

Il **secondo approccio**, utilizzato in [31], [32] e [33] distingue la fase di rilascio e la fase di dispersione. Queste fasi sono studiate in due modi differenti e il risultato della prima diventa l'input della seconda.

La **fase di rilascio** comprende il fenomeno fisico di perdita da una tubazione o da un serbatoio ad alta pressione in un ambiente a pressione ambiente.

La **fase di diffusione** coinvolge tutti i fenomeni fisici dopo che il getto rallenta fino a valori paragonabili alla velocità del vento.

Le seguenti fasi verranno dettagliatamente analizzate nel Capitolo 3.

Mentre la fase di dispersione viene trattata tramite modelli CFD, la fase di rilascio può essere trattata con modelli diversi.

- Blockage effect
- Modelli Semi-empirici
- Modelli CFD

Il primo modello è utilizzato in [31] dove l'autore ha creato un termine equivalente che tiene conto della prima fase e diviene l'input della fase di dispersione modellata con la CFD. In questo modo non si prende in considerazione il getto sotto-espanso grazie alla geometria del problema, dunque il getto è come se non viene in alcun modo modellato.

Il modello semi-empirico veniva utilizzato soprattutto in precedenza, prima dello sviluppo di computer con performances tali da poter elaborare simulazioni con elevati costi computazionali. I modelli semi-empirici sono utilizzati in aree aperte e su larga scala. Questo modello utilizzato, in [32] tiene conto della quantità integrale di gas rilasciato che diviene un input per la simulazione CFD di diffusione tramite un getto equivalente.

L'ultimo modello considera le due fasi separate ed ognuna modellata tramite simulazioni numeriche. In [33] si hanno due simulazioni CFD: la prima, che tratta la fase di rilascio, tiene in considerazione le caratteristiche supersoniche e comprimibili del getto ed è dunque molto onerosa dal punto di vista computazionale.

Facendo un *confronto* tra i possibili approcci [30], [31], [32] e [33] si nota come l'approccio con modello semi-empirico e la successiva simulazione CFD ha un basso costo computazionale ma non riesce a simulare geometrie complesse. L'approccio con la doppia simulazione CFD mantiene invece la capacità di simulare geometrie complesse.

Si potrebbe scegliere l'approccio con un'unica simulazione CFD [30], ma essa non tiene conto delle sostanziali differenze di time step tra le due fasi che, come evidenziato anche in [18] e [19], vengono fuori dalle simulazioni in [30] e [33]. L'intervallo di tempo richiesto per le simulazioni di dispersione differisce dall'intervallo di tempo richiesto per le simulazioni di rilascio, infatti il tempo di dispersione all'interno della piattaforma trattandosi di metri e con velocità minori ha un tempo maggiore di propagazione.

Nel caso di incidente in un ambiente relativo ad una piattaforma Oil&gas si tratta dunque di ambiente confinato ma la fase di rilascio deve essere analizzata e non può essere trattata tramite modelli semplificativi perché il getto può incontrare ostacoli e dunque variare le proprie caratteristiche, inoltre il rilascio non può essere considerato come un piccolo rilascio perché ha un momento ed una velocità elevata, come dimostra [9].

Questo modello (modello *Source Box*) utilizza gli outputs della simulazione della fase di rilascio come inputs della fase di dispersione (in particolare i parametri di velocità e concentrazione sulle superfici della source box), senza riportare l'intera evoluzione del getto all'interno della source box. La parte d'interesse di questo modello in tale tesi sono dunque le condizioni al contorno che si hanno sulla source box e che verranno analizzate meglio nei paragrafi successivi.

## 2.2 Analisi del problema da affrontare

Questo lavoro tratta come caso studio l'analisi delle conseguenze di un rilascio di metano ad alta pressione e il fenomeno di dispersione nel piano di produzione di una piattaforma offshore.

L'obiettivo è quello di sviluppare modelli capaci di predire i fenomeni dispersivi di gas in una piattaforma petrolifera.

La risoluzione del problema tramite la fluidodinamica computazionale comprende un certo numero di approssimazioni in modo da modellare un fenomeno molto complesso sfruttando dei modelli più semplici.

I principali *steps* da seguire per affrontare il problema sono:

- Geometria e creazione della mesh
- Impostazioni delle condizioni al contorno
- Modello numerico da adottare
- Risoluzioni delle equazioni
- Analisi dei risultati

In questo lavoro di tesi, in seguito all'analisi dalla letteratura, è stato scelto l'utilizzo del modello numerico con modelli turbolenti per l'approssimazione delle equazioni di Navier-Stokes e il modello CFD per le simulazioni. L'applicazione di questi modelli è molto rara nell'ambiente Oil&Gas offshore, tuttavia dalla letteratura sono state prese in considerazione le applicazioni dei vari modelli con geometrie e caratteristiche fisiche comparabili alle caratteristiche del nostro caso studio di ambiente offshore.

Saranno analizzati e comparati differenti casi con le stesse caratteristiche fisiche e geometriche ma che si differenziano per le quantità fisiche definite sulle superfici della source box per valutare come variano i risultati ricavati nelle simulazioni di dispersione a partire dai dati di input impostati come condizioni iniziali.

I principali punti fondamentali che verranno trattati sono:

- la costruzione della griglia di calcolo e gli accorgimenti della mesh in modo tale da infittire le zone di maggior interesse
- la verifica dei parametri di qualità della mesh
- la verifica dei criteri di convergenza delle simulazioni e l'indipendenza dalla griglia di calcolo
- la modifica delle condizioni di input delle simulazioni

### 3. Utilizzo della source box nello studio di dispersione in piattaforma

Per poter trattare la sequenza incidentale che si è tenuta in considerazione tramite il metodo CFD, si è scelto di suddividere il fenomeno trattando separatamente le due fasi. La sequenza incidentale può essere schematizzata in:

- Rilascio ad alta pressione con la formazione di un getto supersonico sotto espanso
- Interazione tra il getto ad alta pressione e l'ostacolo
- Dispersione della sostanza rilasciate

Il lavoro è stato diviso dunque in due parti che sono state trattate separatamente ma contestualmente:

- Fase di Rilascio
- Fase di Dispersione

La *fase di rilascio*, che consiste nello studio di un getto supersonico che fuoriesce da un'ipotetica rottura di una tubazione o di un serbatoio nella piattaforma. Si ha il fenomeno di espansione e accelerazione del gas che passa da condizioni quasi costanti ad un efflusso sonico e successivamente supersonico. Le velocità sono dell'ordine di centinaio di m/s a causa delle elevate pressioni coinvolte. La compressibilità del gas è dunque un parametro fondamentale per le simulazioni da effettuare. Tale fase verrà analizzata dettagliatamente in [9] con lo scopo di catalogare dei modelli di source box prendendo in considerazione la variazione dei parametri fisici e geometrici che caratterizzano le dimensioni della source box. La validazione dei modelli scelti sarà il focus di tale lavoro tramite lo studio di dispersione.

Si vuole dunque sottolineare la stretta connessione che si è mantenuta tra la presente tesi, che tratta la fase di dispersione, con [9], che analizza la fase temporalmente precedente ovvero quella di rilascio. I due lavori sono stati sviluppati in parallelo e con collaborazione per dare continuità allo studio del fenomeno.

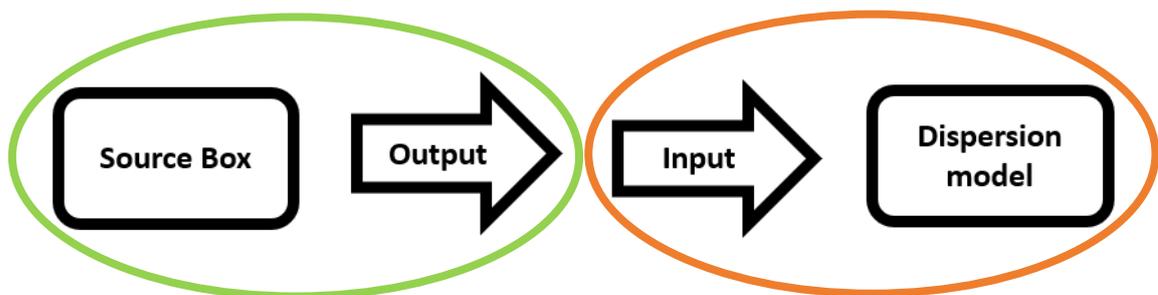
Il modello della prima fase, che comprende il rilascio e l'interazione con l'ostacolo, richiede un elevato costo computazionale. L'introduzione della source box permette di simulare solo la seconda fase che ha un costo computazionale inferiore. Questo risulta dunque interessante al fine di diminuire il tempo richiesto per la fase di design legata all'analisi del rischio di una piattaforma.

La source box ha dunque lo scopo di distinguere il dominio delle due fasi e fungere da interfaccia. Tuttavia, all'interno deve anche essere presente l'ostacolo con cui impatta il getto per una corretta modellazione di rilascio in una tipica piattaforma oil&gas dove gli ostacoli si trovano a distanze molto vicine tra loro.

Dalla prima fase è possibile estrarre i profili di concentrazione e velocità che saranno le condizioni al contorno del dominio e diventeranno gli inputs della fase di dispersione. Le velocità del getto in tale fase sono dell'ordine di centinaia di m/s e a causa delle pressioni coinvolte. La forza inerziale del getto è la forza predominante che muove il fluido che è sottoposto a fenomeni di espansione con onde di shock.

Nella **fase di dispersione** il moto del gas può essere trattato come incomprimibile e la velocità media è molto più bassa del caso precedente e paragonabile alla velocità del vento.

Tale fase è valutata in termini di volume della nube infiammabile e zone raggiunte all'interno della piattaforma. Il volume delle sostanze infiammabili è utile per la valutazione delle conseguenze perché influenza i fenomeni fisici che possono verificarsi nell'ambiente offshore in seguito alla sequenza incidentale. Le velocità sono dell'ordine di qualche m/s comparabili a quelle del vento. Il moto è di tipo incomprimibile.



*Figura 3.1: Approccio a due step*

Le simulazioni di dispersione partono dunque dai risultati ottenuti dalla prima fase che diventano parametri inputs per la successiva in modo da ottenere simulazioni realistiche dell'evoluzione dell'incidente. Saranno analizzate, tramite simulazioni CFD con il software Ansys Fluent, soluzioni approssimate in cui si riprendono gli output della fase di rilascio in modo semplificato e strategico con l'obiettivo di determinare la sensibilità ai dati di input provenienti dalla fase di rilascio.

I modelli di dispersione hanno l'obiettivo di valutare le concentrazioni della sostanza rilasciata che si raggiungono nella dinamica dell'incidente in modo tale da esaminare i fenomeni che ne possono derivare.

I fenomeni che possono aver luogo dipendono in particolare dalle concentrazioni in gioco perché da queste dipendono le quantità coinvolte e le aree interessate. È dunque importante

monitorare le concentrazioni del flusso di metano rilasciato all'interno della piattaforma, in particolare le concentrazioni che ricadono nel range caratteristico detto intervallo di infiammabilità della sostanza, dove la miscela di aria e metano può bruciare ad una data temperatura e pressione e autosostenersi.

La valutazione delle conseguenze può essere effettuata tramite:

- Modelli tabellari
- Modelli parametrici
- Simulazioni con modelli CFD
- Esperimenti su modelli in scala

La scelta del modello dipende dal grado di *dettaglio* richiesto per la stima delle conseguenze.

In ambito offshore la fase di scelta del modello da utilizzare è molto delicata a causa dell'ambiente congestionato della piattaforma, dunque il modello da applicare deve essere in grado di caratterizzare bene il fenomeno sia ad una distanza ridotta dal punto di rilascio che, trattare la geometria a distanze maggiori in modo tale da attenzionare in maniera dettagliata i valori di concentrazione raggiunti dalle sostanze coinvolte, che risultano pericolose sia in termini di infiammabilità che tossicità.

I modelli parametrici non considerano la geometria della piattaforma che risulta un'area congestionata per la presenza di numerosi ostacoli e la complessità dei fenomeni fisici, per questo e per gli altri motivi prima analizzati, in 2.1, si è scelto di adottare i modelli CFD.

Per portare avanti tale lavoro di ricerca sono necessari approcci innovativi che permettono di simulare gli incidenti presi in considerazione nell'arco dell'analisi, senza troppi costi operativi e computazionali al fine di valutare correttamente il rischio nelle piattaforme offshore.

La presente tesi si focalizzerà sulla fase di dispersione delle sostanze rilasciate; il rilascio e l'interazione del getto sono state dettagliatamente analizzate in [9]. Per comprendere i casi studio scelti in tale tesi è opportuno capire le scelte di modellazione della source box.

### 3.1 Richiami al concetto di Source box

Nella tesi [9], che considera il rilascio e l'interazione getto-ostacolo, sono analizzati diversi modelli di source box. Il dominio della source box è inteso come il dominio in cui avviene il rilascio della sostanza finché la velocità del getto non assume valori paragonabili alla velocità del vento.

La piattaforma è un'area con molti ostacoli, in cui vi sono oggetti cilindrici come tubazioni, separatori e scrubbers, o condotti d'aria, e pareti. Il getto dunque può essere considerato come getto libero all'interno della piattaforma, ma ci si aspetta più frequentemente che durante la fase di espansione interagisca con un ostacolo nelle vicinanze della zona di rilascio. In [9], particolare attenzione è stata data allo studio dell'interazione del getto con l'ostacolo.

Vi sono numerosi parametri coinvolti che incidono e diversificano le possibili evoluzioni dell'incidente, modificando il fenomeno dell'impatto del getto con l'ostacolo. L'obiettivo è di creare una sorta di libreria di source box riducendo il numero totale di sequenze possibili derivanti dai numerosi parametri coinvolti.

Le variabili in gioco sono diverse, quali:

- Diametro del foro
- Pressione di rilascio
- Direzione del getto
- Dimensione dell'ostacolo
- Distanza dell'ostacolo dalla rottura

Tramite la creazione di una libreria si avrà chiaro come avviene la dispersione all'interno della piattaforma e dei possibili danni e conseguenze, a partire da dati caratteristici del rilascio. Tali risultati saranno poi, nell'arco di durata del progetto, verificati e validati sperimentalmente tramite la costruzione della piattaforma in scala ridotta.

Il dominio della source box, che contiene lo spazio in cui il getto va da una velocità supersonica fino ad avere velocità paragonabili a quella del vento, è stato scelto secondo le ipotesi di Stephens [34] per cui il getto assume una velocità comparabile con quella del vento ad una distanza di circa  $10 \cdot X_{Mach}$  rispetto alla sorgente, dove  $X_{Mach}$  è la distanza a cui si forma la prima cella corrispondente al disco di Mach. Tale regione è quella che viene comunemente definita come regione di transizione tra moto supersonico e moto subsonico.

$$X_{Mach} = 0.645 * d_{foro} \sqrt{\frac{p_{serbatoio}}{p_{ambiente}}}$$

Il processo di espansione finisce ad una distanza di  $10 * X_{Mach}$ , si può dunque assumere tale valore per dimensionare la source box.

$$L_{SB} = 10 * 0.645 * d_{foro} * \sqrt{\frac{p_{serbatoio}}{p_{ambiente}}}$$

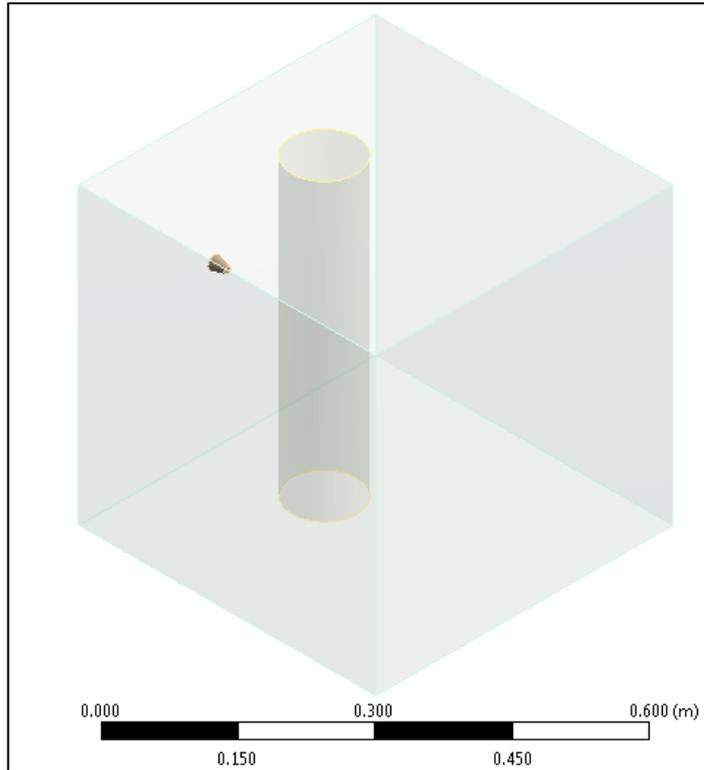
Dove  $d_{foro}$  è il diametro del foro ovvero la dimensione della rottura,  $p_{serbatoio}$  è la pressione di rilascio e  $p_{ambiente}$  è la pressione ambiente [34].

La source box avrà dunque dimensioni crescenti al crescere del diametro di rottura e della pressione. In particolare, al variare del diametro del foro e della pressione di rilascio si possono distinguere differenti casi in termini di dimensioni della source box, in particolare sono stati considerati i valori elencati in Tabella 3.1.

Diametro del foro [cm]	Pressione di rilascio [bar]	Dimensione source box [m]
1	5	0,14
	10	0,20
	25	0,32
	50	0,46

Tabella 3.1: Dimensioni della source box considerate

La source box, come mostrato in figura ricavata da [9], avrà dunque una forma cubica con dimensione del lato linearmente dipendente dal diametro del foro di rottura. Il volume della source box, che ha origine dal punto di rilascio, contiene al suo interno un ostacolo e termina quando si esauriscono i fenomeni di comprimibilità del gas.



*Figura 3.2: Rappresentazione della source box [9]*

### 3.2 Source box come black box per i modelli di dispersione CFD

Gli outputs del modello della source box diventano dunque gli inputs per la modellazione CFD della dispersione delle sostanze rilasciate nella piattaforma modellata da questo lavoro di tesi che ha lo scopo di quantificarle.

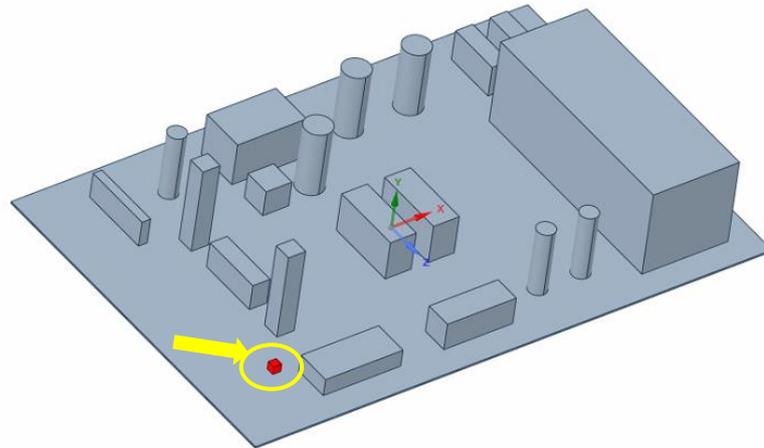


Figura 3.3: Collocazione della source box nella piattaforma

Secondo le statistiche a nostra disposizione, le rotture da fori di piccole dimensioni risultano quelle con maggiore frequenza, come mostrato in Tabella 3.2 [35].

(a) All piping release frequencies (per metre year) by pipe diameter

HOLE DIA RANGE (mm)	2" DIA (50 mm)	6" DIA (150 mm)	12" DIA (300 mm)	18" DIA (450 mm)	24" DIA (600 mm)	36" DIA (900 mm)
1 to 3	9.0E-05	4.1E-05	3.7E-05	3.6E-05	3.6E-05	3.6E-05
3 to 10	3.8E-05	1.7E-05	1.6E-05	1.5E-05	1.5E-05	1.5E-05
10 to 50	2.7E-05	7.4E-06	6.7E-06	6.5E-06	6.5E-06	6.5E-06
50 to 150	0.0E+00	7.6E-06	1.4E-06	1.4E-06	1.4E-06	1.4E-06
>150	0.0E+00	0.0E+00	5.9E-06	5.9E-06	5.9E-06	5.9E-06
TOTAL	1.5E-04	7.4E-05	6.7E-05	6.5E-05	6.5E-05	6.5E-05

Tabella 3.2: Frequenze di rottura [35]

Nella fase di rilascio [9] la source box è stata modellata con i dati geometrici descritti nella paragrafo 3.1. Tra queste, si è scelta una source box che può essere assimilabile alla rottura di una tubazione, una flangia o una valvola.

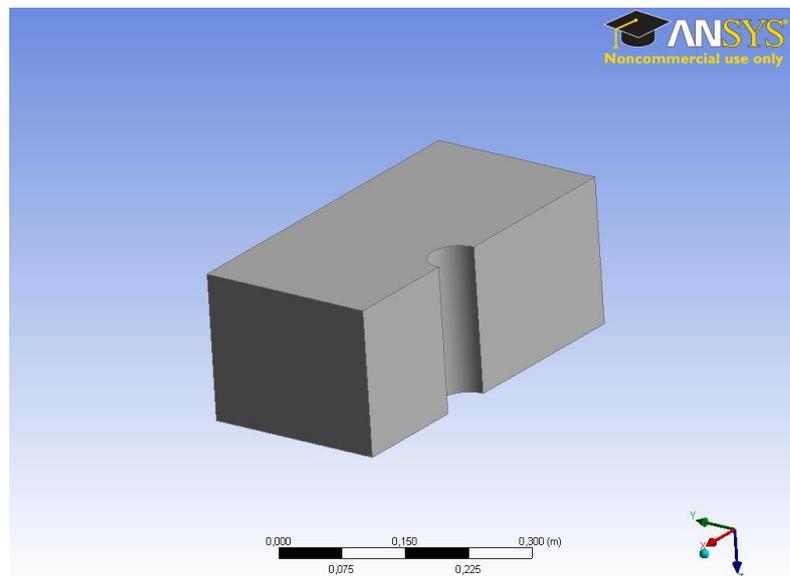
Si è scelta come modello la rottura di una pipeline all'interno della quale passa del metano pressurizzato.

Le dimensioni caratteristiche della source box scelta sono elencate nella Tabella 3.3:

<b>Diametro del foro [cm]</b>	1
<b>Pressione di rilascio [bar]</b>	50
<b>Dimensione source box [m]</b>	0.46
<b>Diametro ostacolo [cm]</b>	10
<b>Distanza dal punto di rilascio [cm]</b>	10

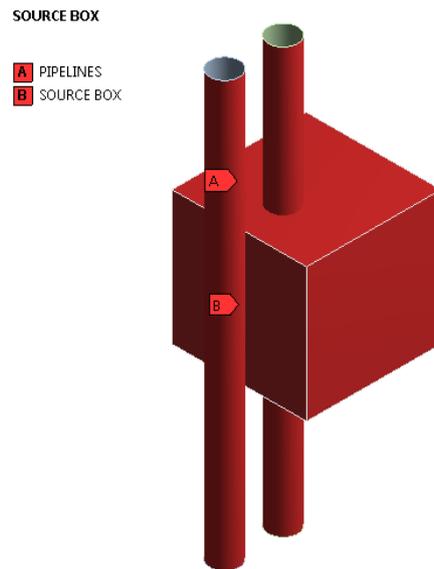
*Tabella 3.3: caratteristiche della source box*

Nella figura 3.4 è mostrato un quarto della source box (per snellire il costo computazionale è stata sfruttata la simmetria cubica del dominio), con l'ostacolo cilindrico ad una distanza di 10 cm.



*Figura 3.4: Geometria utilizzata per la fase di rilascio [9]*

Considerando lo spazio congestionato della piattaforma, si è ipotizzato che il getto di metano che fuoriesce dalla pipeline intercetti un'altra pipeline. Tale ipotesi è frequente in ambiente Oil&gas per la presenza di numerose tubazioni all'interno dei decks in cui vi sono numerose pipelines disposte in parallelo, come rappresentato in Figura 3.5.



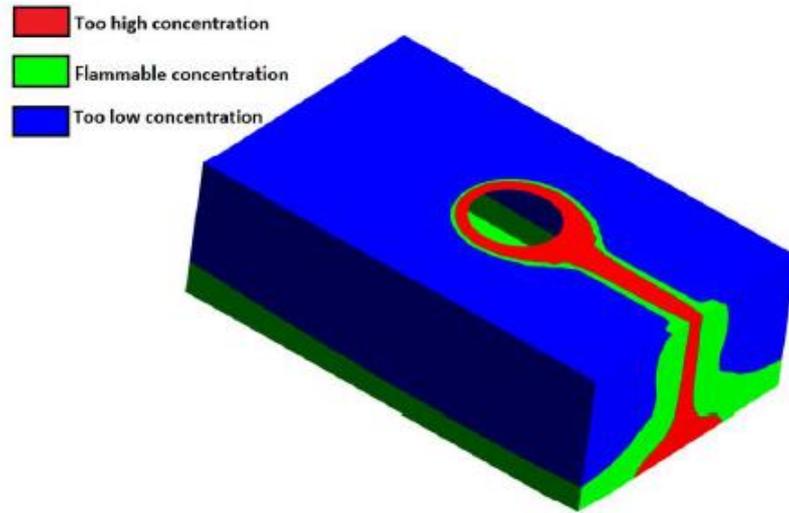
*Figura 3.5: Pipelines in parallelo*

In Figura 3.4, la source box corrisponde al cubo rosso, mentre i due cilindri corrispondono alle due pipelines parallele che si trovano ad una distanza di 10 cm tra loro. Si può notare che la source box contiene al suo interno la pipeline adiacente che viene considerata come ostacolo su cui impatta il getto, mentre ha inizio dove vi è il punto di rottura della prima pipeline.

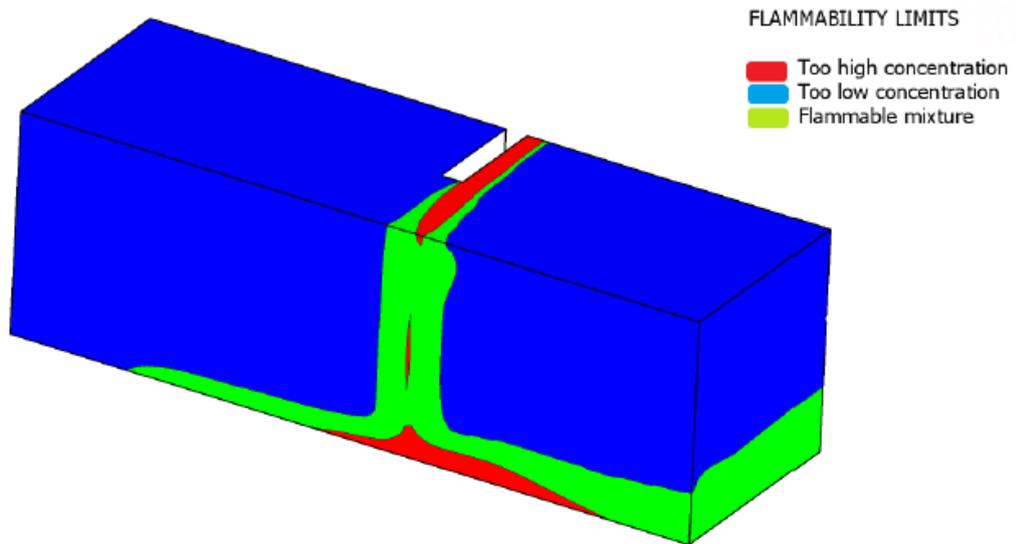
In base ai risultati ottenuti dalle simulazioni della prima fase si è scelto di considerare solo alcune delle superfici della source box, quelle con valori di concentrazioni e velocità interessanti per le simulazioni di dispersione.

Analizzando i risultati ottenuti in [19] e [18] rappresentati rispettivamente in Figura 3.6 e Figura 3.7, si nota che le superfici sono rappresentate con colori diversificati a seconda dei valori di concentrazione sulle superfici esterne della source box.

È utilizzato il colore verde se la concentrazione della sostanza si trova all'interno del range di infiammabilità, il colore rosso al di sopra del valore massimo, UFL, ed il blu al di sotto del valore minimo, LFL. Le superfici di maggiore interesse in termini di infiammabilità sono dunque differenti a seconda della forma dell'ostacolo.

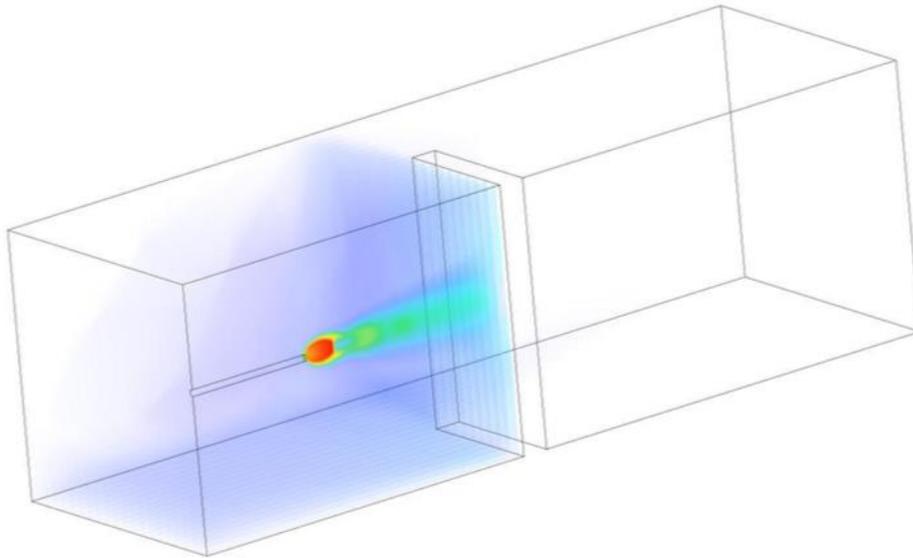


*Figura 3.6: Particolare dei limiti di infiammabilità sulle superfici [19]*



*Figura 3.7: Particolare dei limiti di infiammabilità sulle superfici [18]*

Nel caso di lastra piana il gas tende a concentrarsi in prossimità dell'ostacolo e solo una minima parte riesce a superarlo (Figura 3.8) ciò è dovuto al blockage effect, dunque come si nota dalla Figura 3.7 le superfici con maggiore quantità di gas sono quelle laterali e la superficie superiore.



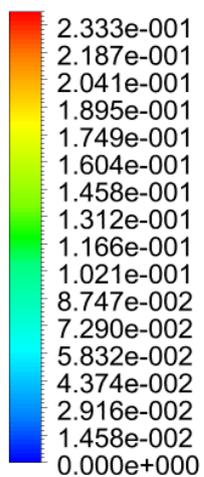
*Figura 3.8: Rilascio contro la parete piana [18]*

Nel presente lavoro di tesi, le simulazioni sono state effettuate con l'ipotesi di ostacolo cilindrico, avendo a disposizione il lavoro svolto in parallelo da [9]. Il caso con piastra piana sarà trattato in seguito.

Il getto di gas che impatta un ostacolo cilindrico avvolge il cilindro, grazie all'effetto Coanda, e riesce a superarlo disperdendosi nella zona oltre l'ostacolo.

La superficie di maggiore interesse, come evidenziato anche dalla Figura 3.9 ottenuta in [9], è quella oltre l'ostacolo, opposta al punto di rilascio.

Ch4.Mass Fraction



ANSYS  
R18.2  
Academic

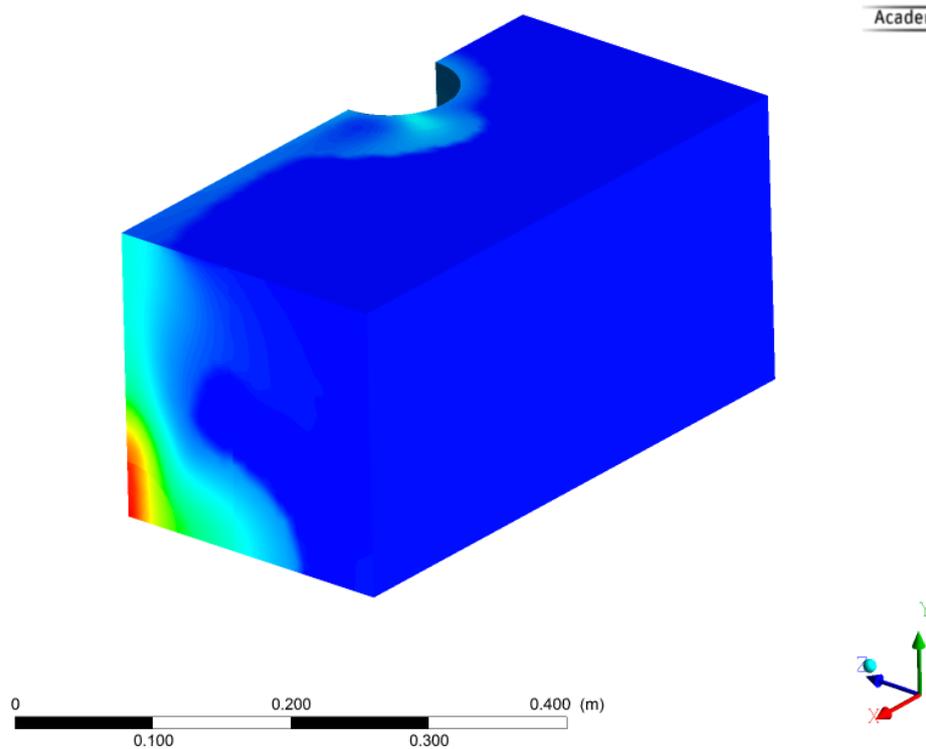


Figura 3.9: Distribuzione concentrazioni [9]

## 4. Definizione del caso studio e modellazione CFD

Le simulazioni sono state effettuate con la versione accademica del software Ansys Fluent 18.2 presente nel laboratorio SEADOG presso il Politecnico di Torino. La Workstation utilizzata ha una memoria di 64Gb e 8 processori. Tali caratteristiche sono state impostate nel Setup di Fluent per un più rapido utilizzo del software.

Il software è uno dei più diffusi in ambito ingegneristico, consente accurate analisi CFD con l'utilizzo di differenti modelli di turbolenza e differenti mesh, dunque è flessibile e utilizzabile per un'ampia gamma di problemi fluidodinamici.

Fluent è un solver con risoluzione a volumi finiti che tramite la sezione post-processing consente di visualizzare i risultati delle simulazioni. La maggiorparte della simulazioni sono state create con l'utilizzo di Ansys Workbench.

Di seguito sono analizzate le procedure adottate per le simulazioni.

### 4.1 Modellazione con Ansys Fluent

Le simulazioni sono modellate tramite una procedura dove è necessario impostare una serie di parametri necessari per la risoluzione. All'apertura del software si è scelto l'utilizzo di Fluent come Fluid Flow come mostrato in Figura 4.1.

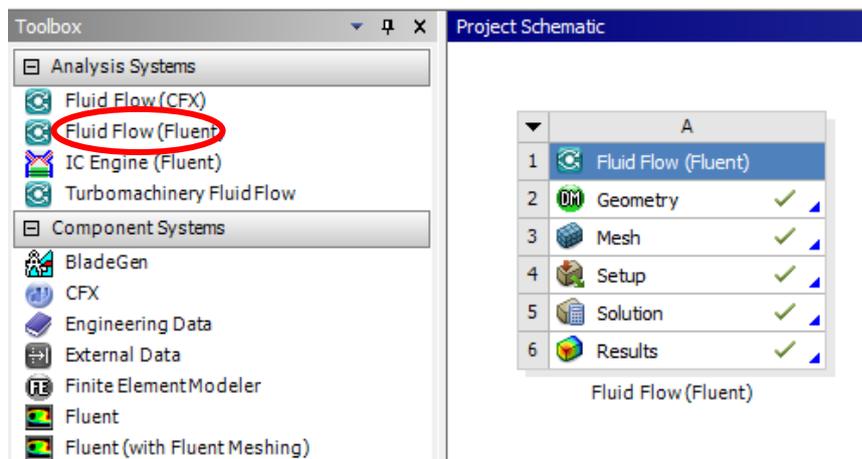


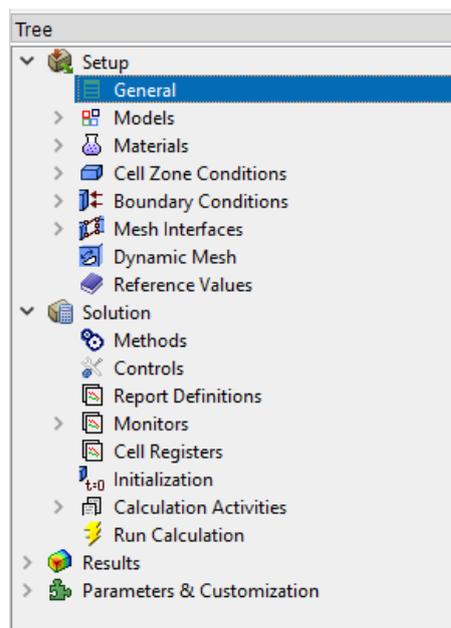
Figura 4.1: Schermata iniziale del software Fluent

La scelta della modellazione tramite la source box permette di affrontare il problema a valle dell'espansione, in tal modo si può assumere l'ipotesi di gas perfetto e moto incomprimibile.

La modellazione del problema, quale il fenomeno di diffusione del metano nel deck di produzione, tramite Fluent, come è possibile notare in Figura 4.2, richiede diversi passaggi che verranno analizzati dettagliatamente nei paragrafi successivi:

- Definizione della geometria
- Definizione della mesh
- Setup
- Solution
- Results

In tale paragrafo ci occupiamo di analizzare in particolare il Setup della modellazione che richiede il settaggio dei parametri caratteristici del modello.



*Figura 4.2: Setup di fluent*

Il setup consente di impostare le caratteristiche del fluido e del modello da utilizzare.

Il fluido presente nelle simulazioni è una miscela di gas metano ed aria.

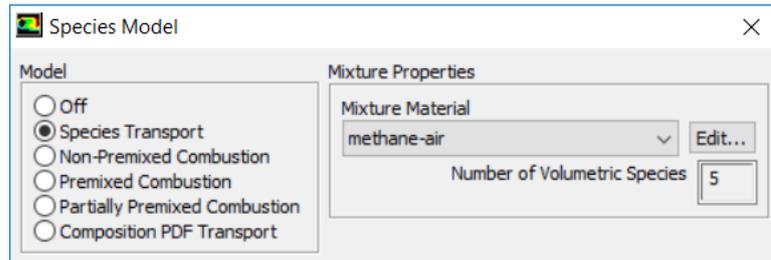


Figura 4.3: Miscela di gas metano e aria: sostanza presenti nelle simulazioni

Si è scelto il modello pressure-based considerando dunque l'aria ed il metano come fluido in moto incompressibile, Figura 4.4.

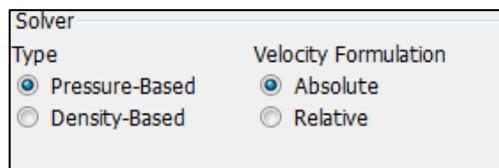


Figura 4.4: Modello adottato

La scelta del modello numerico da adottare viene impostato in *Models*, Figura 4.5. Come modello di turbolenza si è impostato il modello k-w SST.

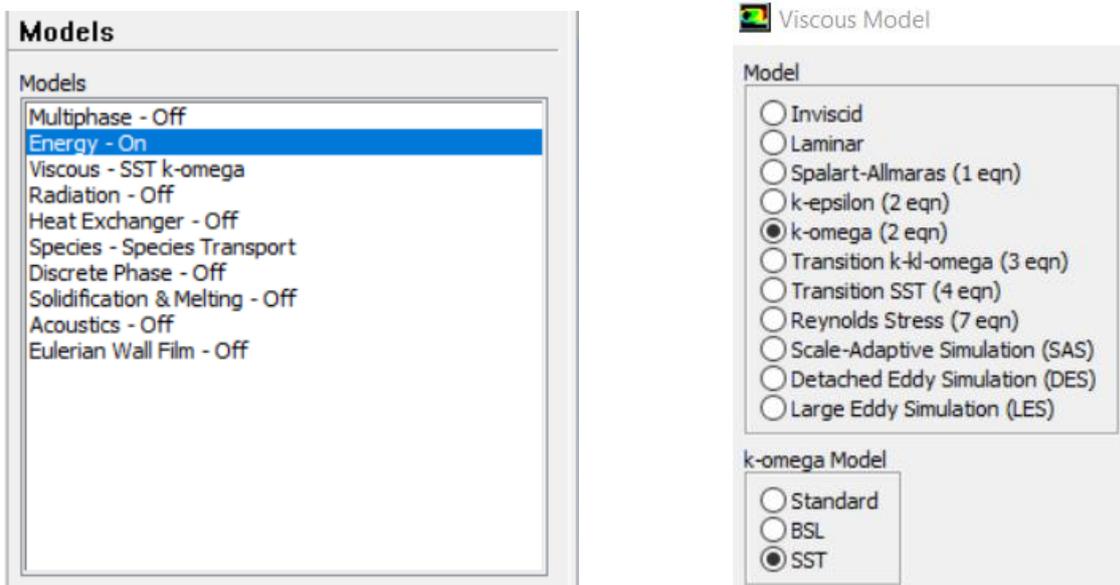


Figura 4.5: Models; si è scelto k-w SST

## 4.2 Geometria

Nelle simulazioni si considera una geometria semplificata prendendo in esame un solo piano della piattaforma con le ipotesi di pavimentazione solida, *plated*. Questo aspetto è molto importante perché influenza le caratteristiche del fenomeno di dispersione. Il corpo della piattaforma è composto quindi tipicamente da una serie di piani chiamati decks che sono aperti lateralmente e dunque lambiti dal vento. In Figura 4.6 è mostrata la geometria scelta per le simulazioni svolte.

ANSYS  
R18.2  
Academic

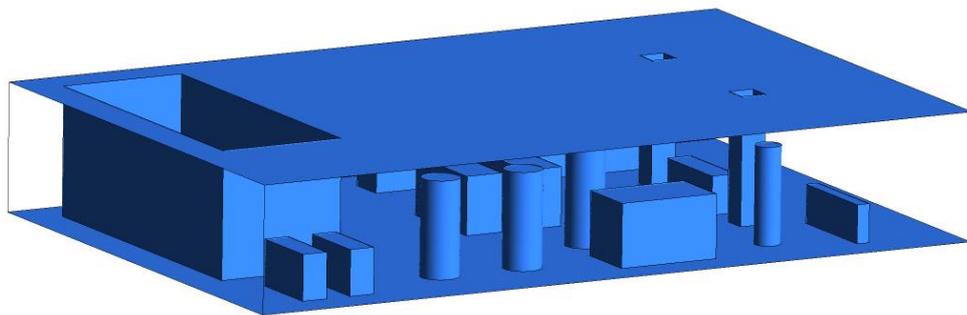


Figura 4.6: *Plated deck*: geometria scelta

Con questa tipologia di deck, vi è una completa separazione tra i piani che, dunque, impedisce il passaggio anche di aria. La scelta tra le due dipende dalle tecniche di gestione della sicurezza adottate. In *Italia*, come in generale in Europa, la scelta ricade spesso sulla scelta della pavimentazione *plated*, non permeabile per le sostanze infiammabili che possono essere presenti, in modo da ridurre il volume coinvolto. La nube di gas infatti resta confinata in un solo piano. Tale scelta rispetto al *deck grated*, cioè la griglia metallica che permette il passaggio di fluidi da un piano all'altro, dipende dalla sostanza presente e prodotta all'interno della piattaforma. In Italia la maggiorparte delle piattaforme producono *gas* dunque la scelta ricade sulla pavimentazione *plated*.

Si è scelta dunque una geometria semplificata prendendo in considerazione un solo piano della piattaforma, in particolare il *piano di produzione* dove sono presenti tutti i sistemi di trattamento e separazione di olio, gas e acqua, e i sistemi e le valvole di controllo e sicurezza.

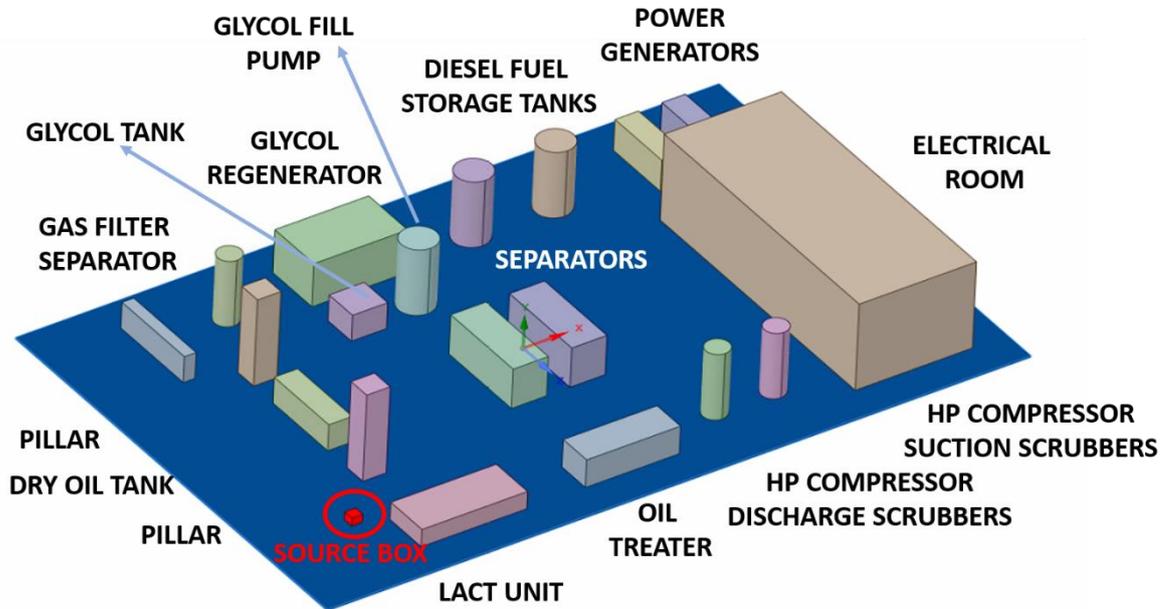


Figura 4.7: Piano di produzione con sistemi presenti

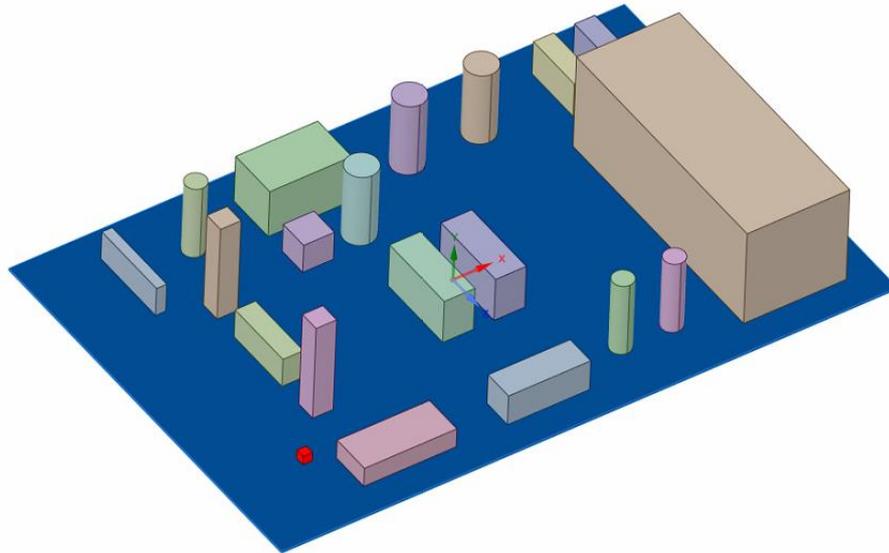
Le *dimensioni* caratteristiche della piattaforma sono state scelte in riferimento ad una piattaforma reale esistente situata su una struttura fissa.

Il piano di produzione della piattaforma scelta ha una lunghezza di 30m, larghezza di 20m ed un'altezza di 5m con una distanza interdeck di 0,1m; le dimensioni complessive sono riportate nella Tabella 4.1.

Dimensioni caratteristiche	
Lunghezza [m]	30
Larghezza [m]	20
Spessore deck [m]	0.1
Distanza Interdeck [m]	5
Lato piloni [m]	1

Tabella 4.1: Dimensioni caratteristiche della geometria scelta

La geometria e il posizionamento di oggetti è stata scelta sempre in riferimento alla piattaforma reale in modo da simulare lo spazio congestionato tipico di una piattaforma Oil&Gas, come rappresentato in Figura 4.8.



*Figura 4.8: Deck di produzione*

La miscela di gas, olio e acqua estratta deve essere separata per produrre olio e gas, ciò avviene tramite tre principali sezioni quali un separatore trifase, un sistema di pompaggio dell'olio e un sistema di compressione del gas.

I **principali componenti** presenti nel deck di produzione sono rappresentati nella figura 4.9 seguente ed elencati nella Tabella 4.2 sottostante.

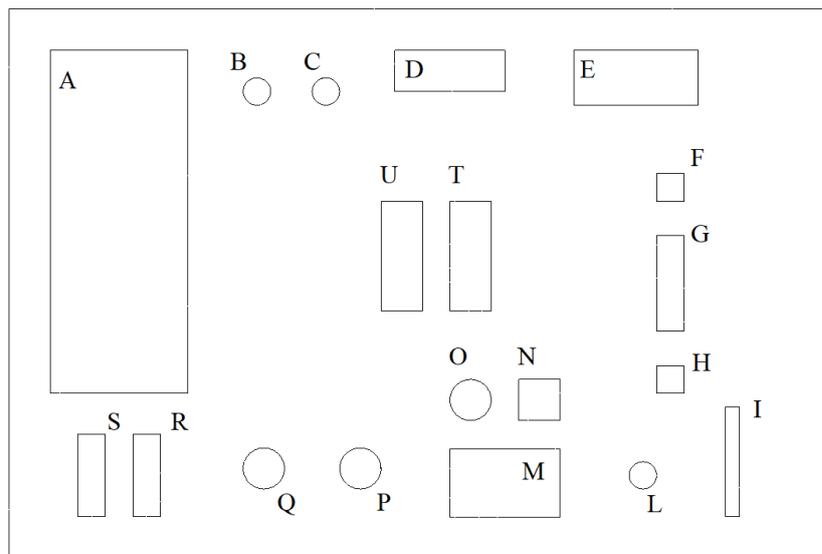


Figura 4.9: Deck di produzione, visione dall'alto

	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

Tabella 4.2: Componenti presenti nel deck di produzione

Il primo step nel piano di produzione di una piattaforma offshore è il processo di separazione. La miscela estratta dal pozzo viene trattata in modo da separare le varie fasi.

I *separators* sono separatori orizzontali trifase che separano l'olio, il gas e l'acqua. La maggiorparte dell'acqua è separata dall'olio per gravità e il gas dal liquido. Da questo componente sono dunque ottenuti tre differenti flussi:

- Miscela di acqua e sabbia
- Olio con impurità
- Gas con impurità

Il gas passa nel ***Hp compressor suction scrubber*** dove viene aspirato qualsiasi liquido presente. La compressione riscalda il gas e un refrigerante è presente dopo ogni stadio di compressione. Ad elevate pressioni un'ulteriore quantità di liquido può essere separata, dunque il gas entra in un altro scrubber per un ulteriore stadio di compressione per essere compresso e raffreddato nuovamente. L'ultimo stadio ***Hp compressor discharge scrubber***. non prevede una refrigerazione finale.

Il gas in uscita viene mandato nel sistema di deidratazione tramite glicole, ***Glycol dehydration***.

Nel processo di deidratazione, il gas saturo d'acqua entra dal basso e inviato verso l'alto tramite ***Glycol fill pump*** e fuoriesce dall'alto a processo completato, mentre il flusso di glicole liquido si muove verso il basso assorbendo l'acqua dal gas. Il glicole è contenuto in un vessel chiuso, ***Glycol tank***. L'acqua ricca di glicole liquido è riscaldata e l'acqua viene separata dal glicole fino a raggiungere la concentrazione di glicole desiderata che viene reimpressa nel processo. Si ha dunque un sistema continuo, con reimmissione di glicole in un tank chiuso.

***Gas filter separator***

Dopo la separazione dell'acqua dall'olio, l'olio viene inviato nell' ***Oil treater*** dove viene eliminata l'acqua ancora presente in seguito alla prima separazione nel separatore. Il contenuto di acqua può variare dal 1% al 20% in volume. L'olio viene dunque stoccato nel ***Dry Oil Tank***.

***Lact Unit***: Lact è un acronimo per Lease Automatic Custody transfer, è un'apparecchiatura automatica che facilita la misurazione del volume del prodotto petrolifero che viene trasferito da un'entità ad un'altra. Tale unità è collega la linea di alimentazione ad un serbatoio di stoccaggio e ne valuta la portata, la pressione di esercizio e la temperatura dell'olio.

La struttura è supportata da quattro pilastri, ***pillars***, di cui due non sono visibili nella pianta poiché presenti all'interno dell'electrical room.

L' ***Electrical room*** è isolata dal resto del deck. All'interno sono presenti tutti i dispositivi per l'apparecchiatura utilizzata per mantenere costantemente alimentati gli apparecchi elettrici, ovvero il gruppo statico di continuità (UPS). Necessario per quelle apparecchiature che non possono in nessun caso rimanere senza corrente, evitando situazioni gravi.

I ***Pig traps*** sono utilizzati per la pulizia dei tubi in cui si ha il passaggio di petrolio e gas senza la necessità del lavaggio della linea in modo tale da evitare l'accumulo in una tubazione che può causare rallentamenti o addirittura l'ostruzione, assicurandone il corretto funzionamento.

Il sistema di stoccaggio di combustibile diesel, ***Diesel fuel storage tanks***, è dimensionato sulla base della richiesta massima istantanea. In una piattaforma offshore, il diesel può essere

utilizzato in situazioni di emergenza dunque in una piattaforma di dimensioni medie è adeguato uno stoccaggio con una capacità di circa 10-12 giorni.

I **Power generators** sono un ulteriore sistema di emergenza in caso di perdita di potenza elettrica e contributo fondamentale per facilitare la perforazione e lo scavo ma anche il pompaggio e l'effettiva consegna del prodotto finito. Inoltre, forniscono un'alimentazione di emergenza evitando perdite a livello di quantità di tempo e denaro.

Il piano di produzione considerato come *plated* rappresenta dunque il dominio di calcolo utilizzato, che è necessario definire in Fluent. La geometria è stata costruita su **Solidworks** ed importata su Fluent. Il dominio di calcolo utile per le nostre simulazioni in realtà comprende solo il fluido presente all'interno del deck scelto, dunque gli ostacoli presenti non sono ostacoli fisici ma sono stati sottratti al volume del deck grazie all'opzione di Fluent **Boolean**, come si può facilmente comprendere dalla visione dal basso in Figura 4.10.

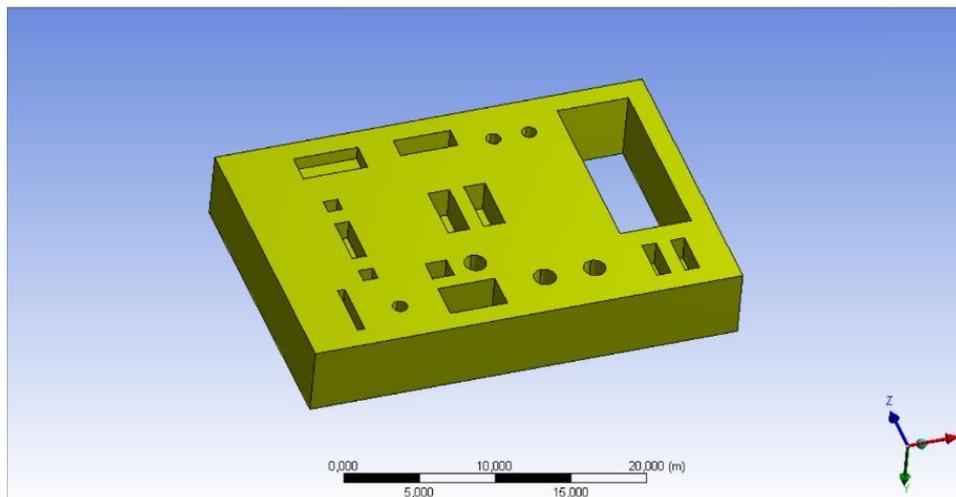


Figura 4.10: Dominio di calcolo, vista dal basso

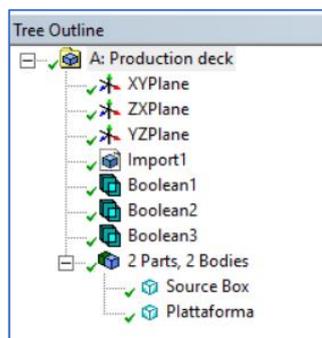


Figura 4.11: Costruzione dominio in Fluent

### 4.3 Boundary conditions

L'imposizione delle condizioni al contorno è necessaria per determinare una delle infinite soluzioni possibili del sistema numerico adottato.

Le condizioni al contorno descrivono le variabili di flusso come velocità, pressione e temperatura sul modello fisico in esame e sono applicate sulle superfici del volume di controllo. Tipicamente sono necessarie almeno quattro condizioni al contorno per i modelli di dispersione di gas, quali: inlet, outlet, top e bottom.

Nel presente lavoro di tesi sono state adottate le condizioni al contorno riassunte nella Tabella 4.3, che verranno analizzate dettagliatamente successivamente.

Superficie	Boundary condition
Superficie degli ostacoli	Wall
Interdeck superiore	Wall
Interdeck inferiore	Wall
Ingresso del dominio	Velocity Inlet
Uscita del dominio	Pressure Outlet
Superficie di rilascio	Velocity Inlet

Tabella 4.3: Condizioni al contorno utilizzate nella modellazione

Il piano inferiore e superiore e tutte le superfici degli oggetti all'interno del deck sono stati settati come **wall** eccetto per la source box. Per wall si intende tutte le superfici solide che non possono essere oltrepassate dal fluido. In Figura 4.12 è possibile vedere in blu tutti gli oggetti e le superfici che sono state settate come wall.

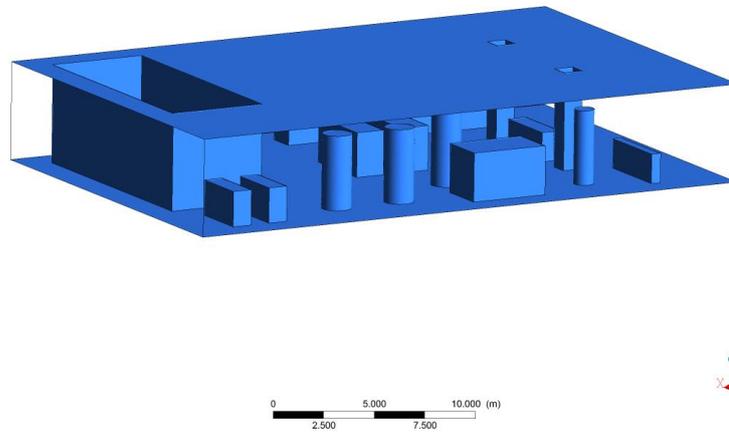


Figura 4.12: Oggetti settati come wall

Si è considerato che il vento può passare all'interno della source box, dunque non è considerata come ostacolo. La source box che può essere attraversata dal vento è settata anch'essa come fluido, Figura 4.13.

Details View	
[-] Details of Body	
Body	Source Box
Volume	0,097336 m <sup>3</sup>
Surface Area	1,2696 m <sup>2</sup>
Faces	6
Edges	12
Vertices	8
Fluid/Solid	Fluid
Shared Topology Method	Automatic
Geometry Type	DesignModeler

Figura 4.13: source box settata come zona fluida

La piattaforma è posta in mare aperto, facendo riferimento alle piattaforme sul territorio italiano nel Mare Adriatico, dove vi è la maggiore densità di piattaforme offshore, si è scelto una velocità media e la direzione del vento in accordo con [36] e [37].

La velocità media annua del vento sulla costa italiana ad un'altezza di 50 metri sul livello del mare, in particolare sul Mare adriatico considerato come zona di interesse, in accordo con [37], come si può notare dalla figura 4.14 va dai 4 m/s agli 8 m/s.

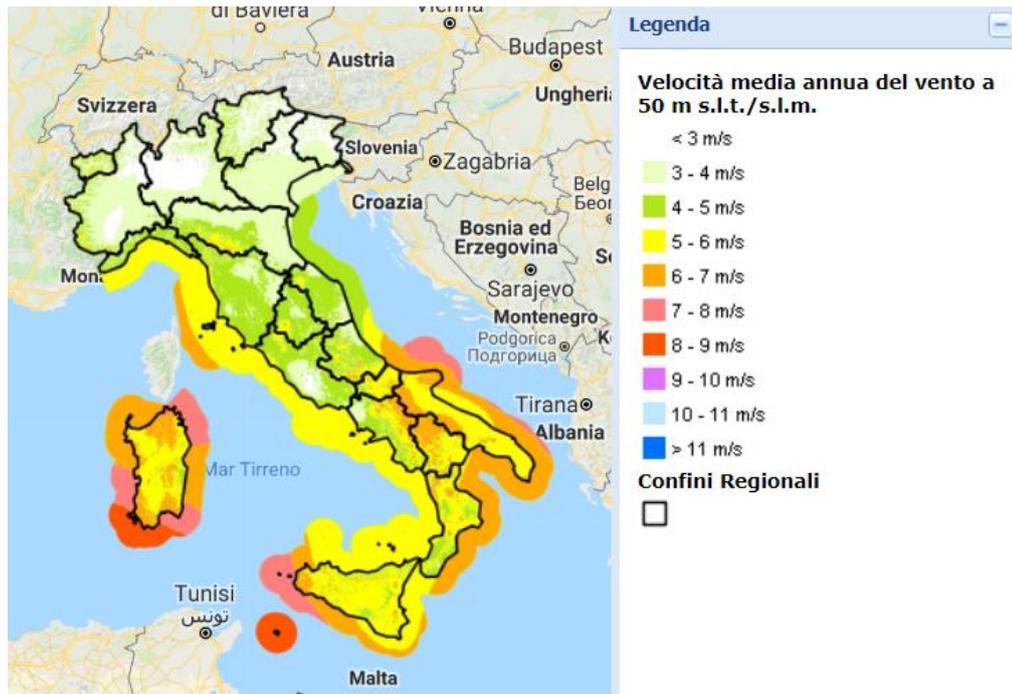


Figura 4.14: Velocità del vento sulle coste italiane [37]

Facendo riferimento alla stazione meteorologica posta a **Ravenna Punta Marina** dai dati della Rete Mareografica Nazionale. Rappresentati in Figura 4.15, si può invece notare come, nell'arco di durata di un anno la direzione del vento più probabile è nord ovest.

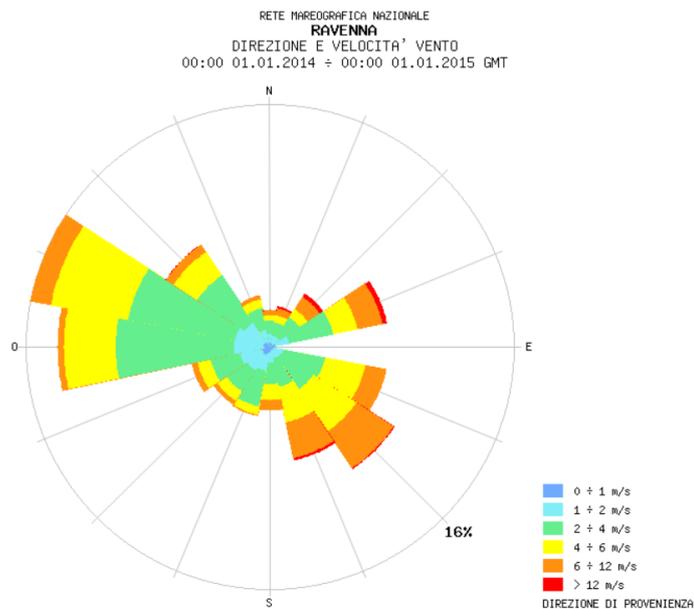


Figura 4.15: Distribuzione della direzione del vento, Ravenna [36]

Considerando la stazione meteorologica *Ancona Boa*, le statistiche basate su osservazioni prese tra 05/2011 e 03/2017 giornalmente dalle 7 alle 19, evidenziano come le direzioni di vento più probabili vanno da NNW a WNW. Tali risultati sono visibili in Figura 4.16.

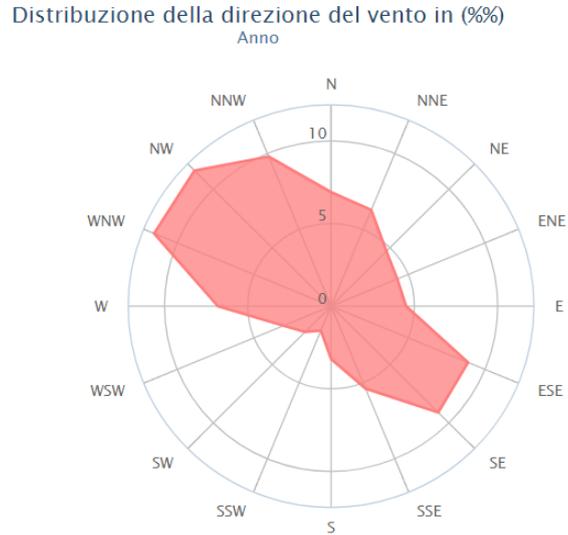


Figura 4.16: Distribuzione della direzione del vento, Ancona Boa [38]

Per le simulazioni si è scelto dunque una velocità del vento di **6 m/s** e la direzione *nord ovest* ed una inclinazione di **45°**. Le condizioni al contorno scelte sul lato posizionato a nord e quello a ovest della piattaforma, come mostrato in figura 4.17, sono di velocity inlet con una velocità del vento di 6 m/s.

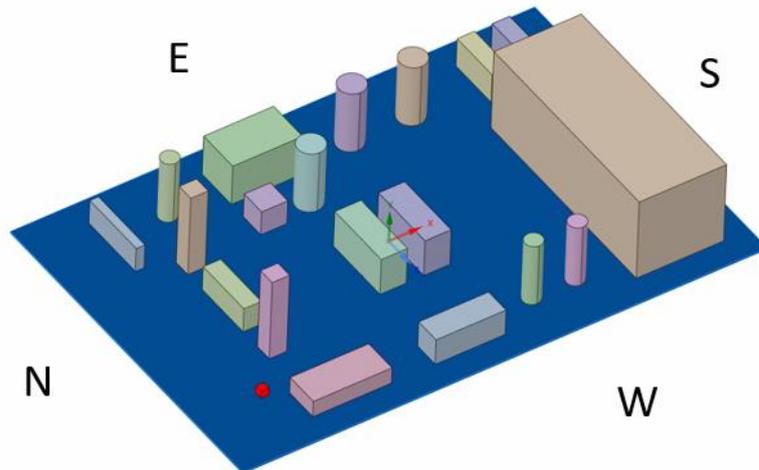
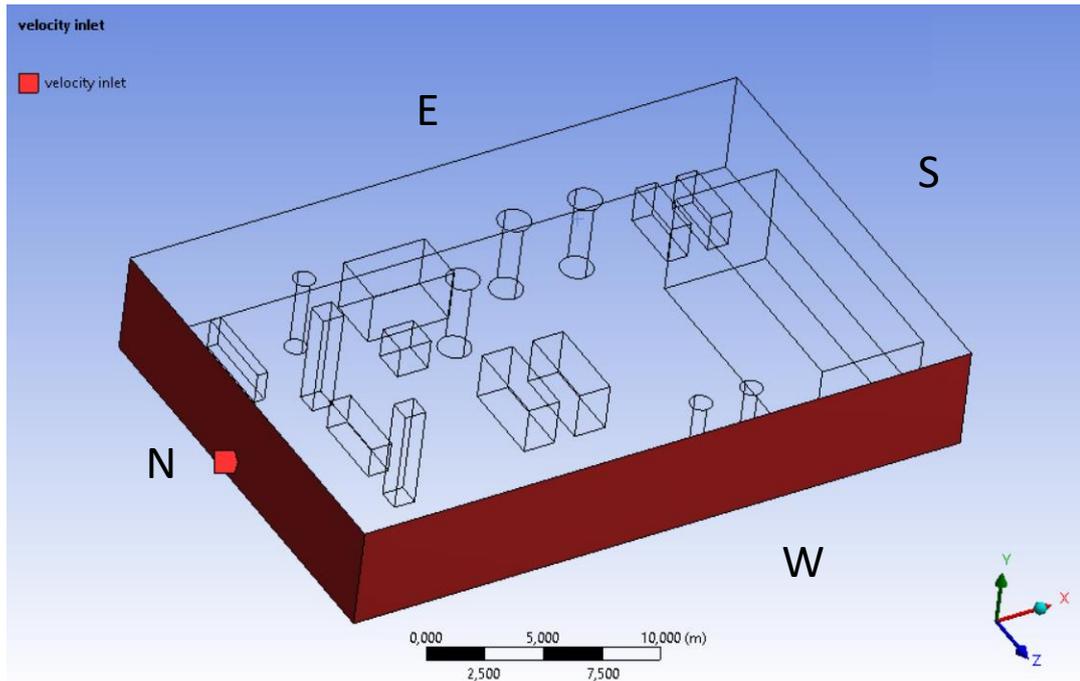
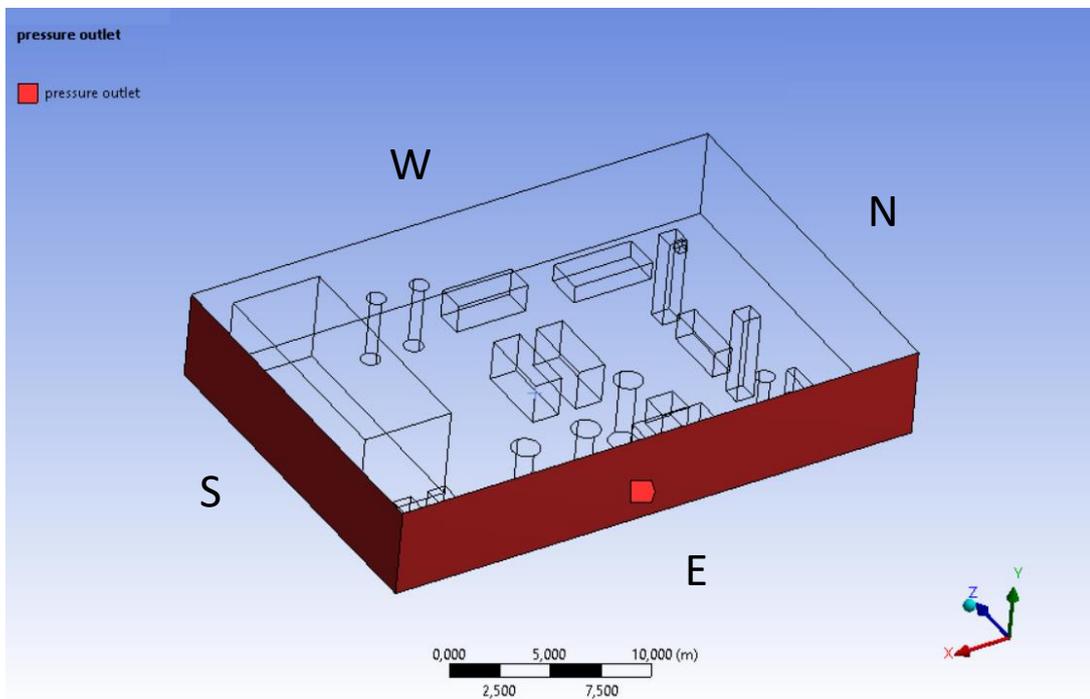


Figura 4.17: Localizzazione piattaforma



*Figura 4.18: Velocity Inlet*

I lati a sud ed a est sono settati come pressure outlet.



*Figura 4.19: Pressure Outlet*

## 4.4 Definizione della mesh

La scelta della mesh è fondamentale, poiché, più è alto il numero di nodi, più ci si avvicina ad una descrizione continua dello spazio, in modo tale da avere una soluzione più accurata riducendo gli errori di approssimazione e mantenendo dei tempi di calcolo accettabili.

All'aumentare della mesh, però, aumenta il costo computazionale poiché aumenta il tempo di calcolo. È dunque fondamentale trovare un compromesso tra l'accuratezza e la qualità complessiva della simulazione fluidodinamica e il costo computazionale. Il compromesso adottato sarà valutato e validato successivamente con le analisi di grid independence.

La costruzione della mesh è stata effettuata tramite un tool installato nel pacchetto ANSYS, dove è possibile modellare in maniera differente le varie regioni impostando i parametri di interesse, come schematizzato in Figura 4.20.

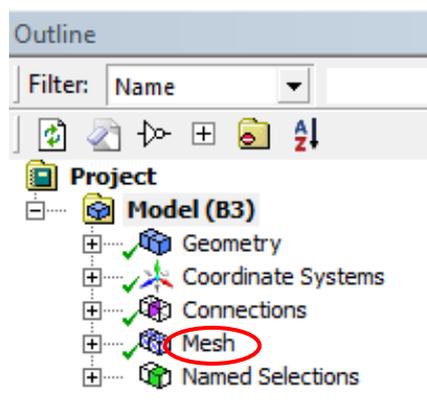


Figura 4.20: Modello delle simulazioni

La generazione della mesh è stata effettuata utilizzando nel primo parametro che deve essere modificavo, ovvero il **Size Function**, una mesh **Fine** e un algoritmo di tipo adattivo, **Adaptive**, per migliorare la risoluzione delle griglia di calcolo. Questa funzione permette di infittire la mesh in prossimità di un ostacolo e consente la generazione di una mesh più fitta nella zone interne della piattaforma e gradualmente più rada nelle zone più esterne. Le celle sono dunque addensate nella zona di interesse come lo strato limite o di rapida variazione delle grandezze fluidodinamiche.

Il parametro **Element size** è stato impostato pari a 0.2 m in modo da avere una qualità della mesh superiore con una mesh più fitta, come si nota in Figura 4.21. Questo parametro infatti permette di definire ulteriormente il dimensionamento della mesh locale, riducendo dunque le dimensioni delle celle.

Details of "Mesh" <span style="float: right;">☰</span>	
<b>Display</b>	
Display Style	Body Color
<b>Defaults</b>	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
<input type="checkbox"/> Relevance	0
Export Format	Standard
Element Order	Linear
<b>Sizing</b>	
Size Function	<b>Adaptive</b>
Relevance Center	Fine
<input type="checkbox"/> Element Size	0.20 m
Mesh Defeaturing	Yes
<input type="checkbox"/> Defeature Size	2.657e-003 m
Transition	Slow
Initial Size Seed	Assembly
Span Angle Center	Fine
Bounding Box Diagonal	36.4010 m
Minimum Edge Length	0.460 m
<b>Quality</b>	
<b>Inflation</b>	
<b>Assembly Meshing</b>	
<b>Advanced</b>	
<b>Statistics</b>	

Figura 4.21: Dettagli della mesh

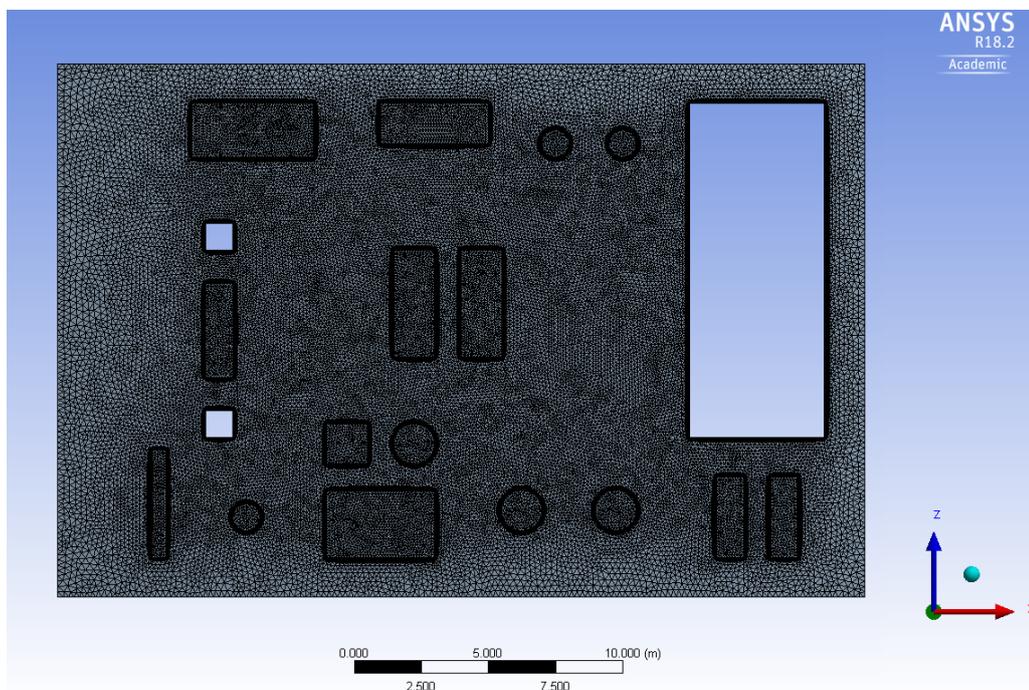


Figura 4.22: Adaptive Mesh, vista dal basso

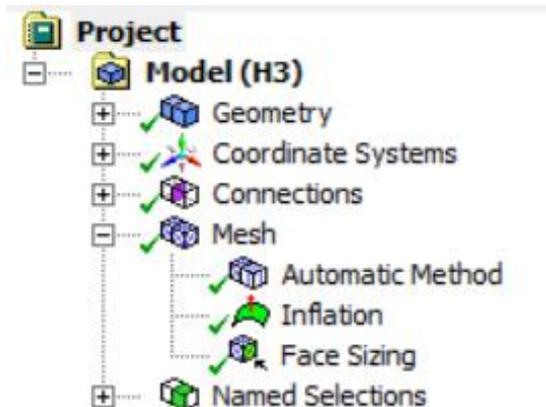


Figura 4.23: Opzioni Mesh

Per migliorare ulteriormente la qualità della mesh, come si nota dalla Figura 4.23, sono state aggiunte alla mesh di base ulteriori funzioni. La densità della mesh deve essere abbastanza elevata da catturare le caratteristiche importanti del flusso. La griglia in vicinanza delle pareti deve essere abbastanza elevata da catturare le caratteristiche importanti dello strato limite, dove quadrilateri ed esaedri e prismi sono preferibili rispetto a tetraedri e piramidi.

- **Automatic Method:** applicato a tutta la geometria del dominio e permette di adattare la mesh alle geometrie complesse presenti nel dominio.
- **Named Selections:** sono state selezionate tutte le facce precedentemente descritte dove vengono impostate le condizioni al contorno, schematizzate in figura 4.24:

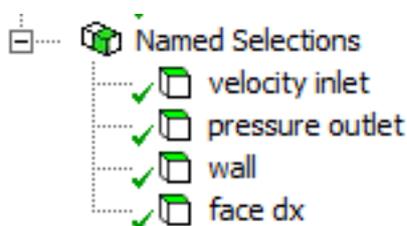


Figura 4.24: Named Selection

- **Inflation**: consente di realizzare dei layers rettangolari, creando un contorno degli ostacoli. È stato applicato a tutte le facce degli ostacoli presenti, poiché utilizzato per infittire la zona di contatto tra un fluido ed una parete in modo tale da catturare gli effetti dello strato limite. In figura 4.25 è riportato il setup dell'inflation, mentre in figura 4.26 le facce a cui è stato applicato.

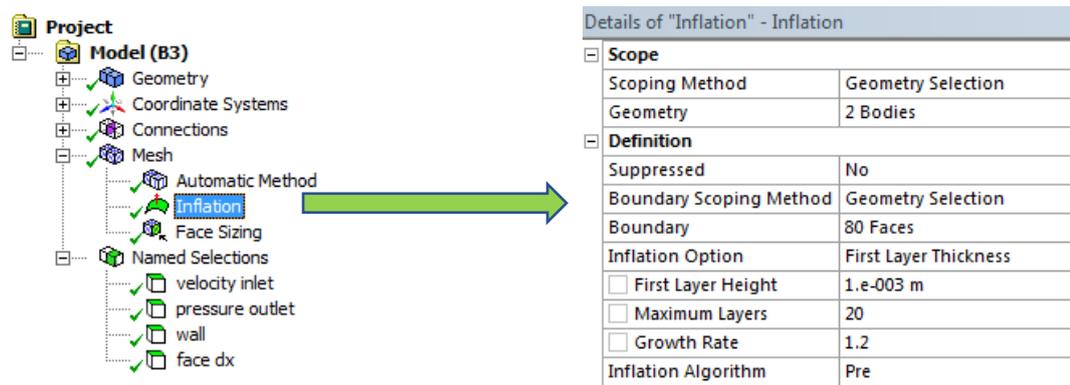


Figura 4.25: Inflation Function

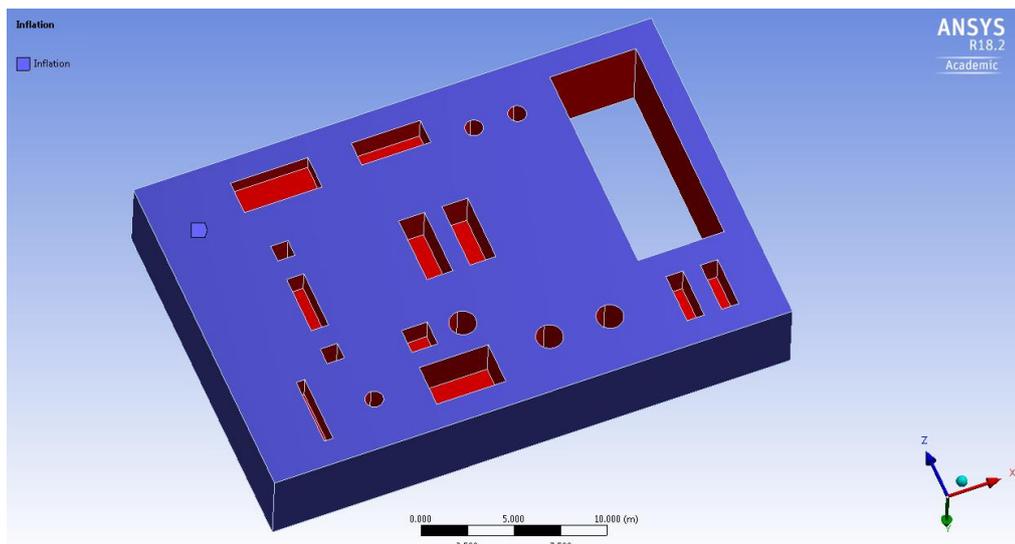


Figura 4.26: Inflation applicato agli elementi interessati, vista dal basso

- **Face sizing:** utilizzato con lo scopo di aumentare la densità di elementi attorno alla source box ad agli ostacoli presenti, modificando la grandezza massima delle celle e impostandola pari a 0.1 m. Si crea dunque in questo modo una regione di contatto tra gli ostacoli presenti e la regione di fluido, dunque una regione di transizione. In figura 4.27 è riportato il setup dell'inflation, mentre in figura 4.28 le facce a cui è stato applicato.

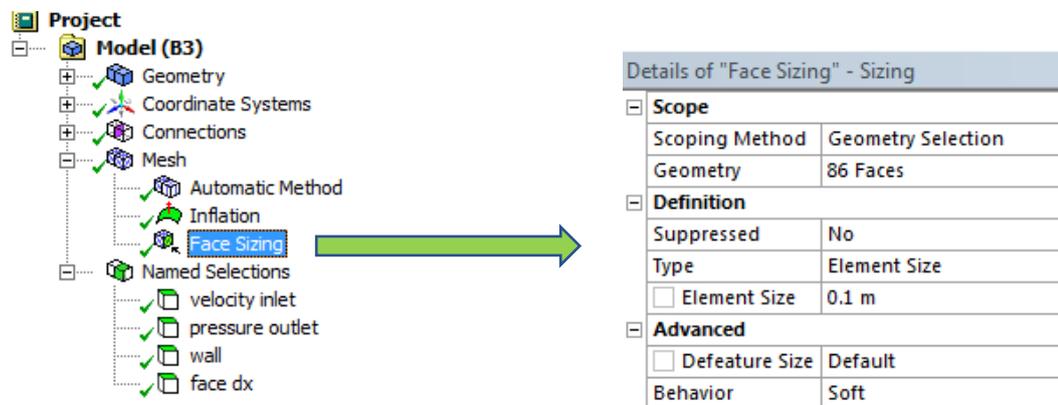


Figura 4.27: Face Sizing

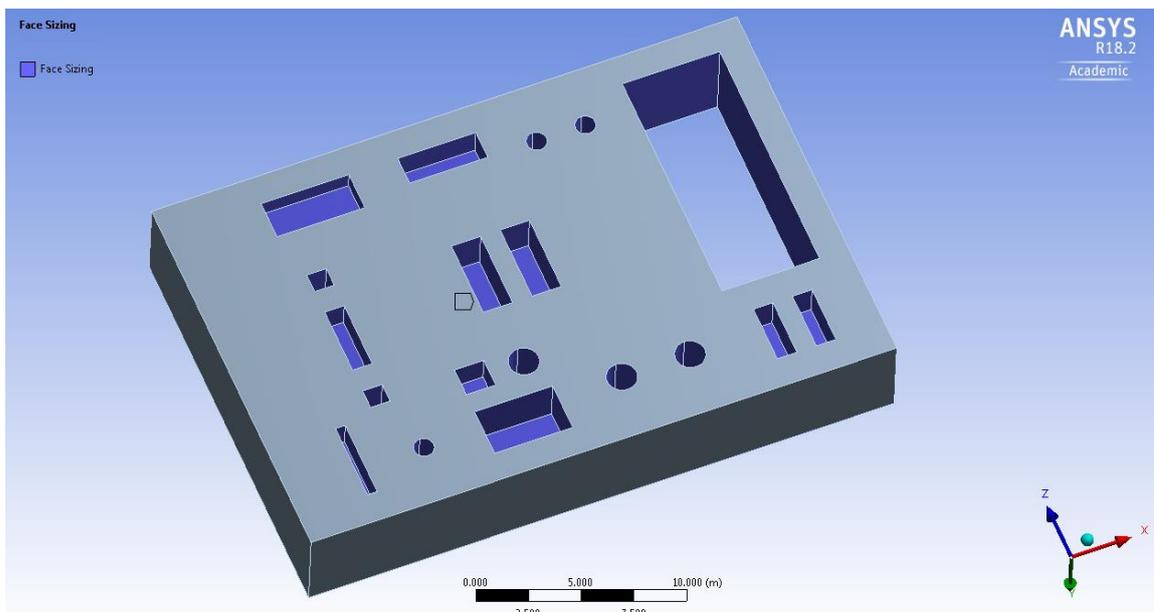


Figura 4.28: Face sizing applicato agli elementi interessati, vista dal basso

Una griglia con una buona qualità rappresenta il primo ed essenziale passo per una simulazione numerica fluidodinamica soddisfacente.

Alcune misure fondamentali della *qualità* di una griglia sono:

**Skewness:** definita come la differenza tra la forma reale della cella e la forma di una cella equilatera di volume equivalente, determina quanto è vicina la cella ad una cella ideale. Elevati valori possono diminuire l'accuratezza e destabilizzare la soluzione. In accordo con la definizione, come rappresentato in Tabella 4.4, dunque un valore pari a zero indica una cella equilatera, un valore pari ad uno indica una cella completamente degenerata.

Valori di Skewness	Qualità della cella
1	Degenerate
0.9 - < 1	Bad
0.75 - 0.9	Poor
0.5 - 0.75	Fair
0.25 - 0.5	Good
> 0 - 0.25	Excellent
0	Equilateral

Tabella 4.4: Valori di skewness e corrispondente qualità della cella

Nel nostro caso si ottiene un valore di circa 0.23, come mostrato in figura 4.29, dunque una qualità della cella eccellente.

Smoothing	Medium
Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	5.2871e-005
<input type="checkbox"/> Max	0.87496
<input type="checkbox"/> Average	0.22943
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0.12463

Figura 4.28: Valore di skewness ottenuto

**Orthogonal quality:** è un indicatore importante per la qualità della mesh e gioca un ruolo significativo per l'accuratezza e la stabilità della soluzione. La cella peggiore avrà un ortogonalità con valore molto vicino allo zero, e la migliore un valore pari ad uno. I valori che si possono ottenere con riferimento alla qualità della mesh sono riportati in Tabella 4.5.

Valori di Orthogonal quality	Qualità della mesh
0.95 – 1	Excellent
0.7 – 0.95	Very good
0.2 – 0.69	Good
0.1 - 0.2	Acceptable
0.001- 0.1	Bad
0 - 0.001	Inacceptable

Tabella 4.5: Valori di Orthogonal quality e corrispondente qualità della cella

Smoothing	Medium
Mesh Metric	Orthogonal Quality
<input type="checkbox"/> Min	3.1461e-002
<input type="checkbox"/> Max	0.99843
<input type="checkbox"/> Average	0.76214
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0.14524

Figura 4.29: Valore di Orthogonal quality ottenuto

Nel nostro caso si ottiene un valore di circa 0.8, come mostrato in figura 4.29, dunque una buona qualità della mesh.

## 4.5 Grid Independence

Per la scelta della mesh da utilizzare per le successive simulazioni è stato fatto un test di grid independence per dimostrare l'indipendenza della soluzione dalla griglia scelta. Per dimostrare che il numero di celle non influenza il risultato, e dunque l'affidabilità dei risultati ottenuti, sono necessarie risoluzioni con mesh differenti. In particolare, è stato valutato l'errore relativo di una grandezza caratteristica al variare del numero di elementi presenti. Sono state considerate cinque griglie di calcolo in modo da scegliere la griglia migliore intesa come compromesso tra affidabilità e costo computazionale.

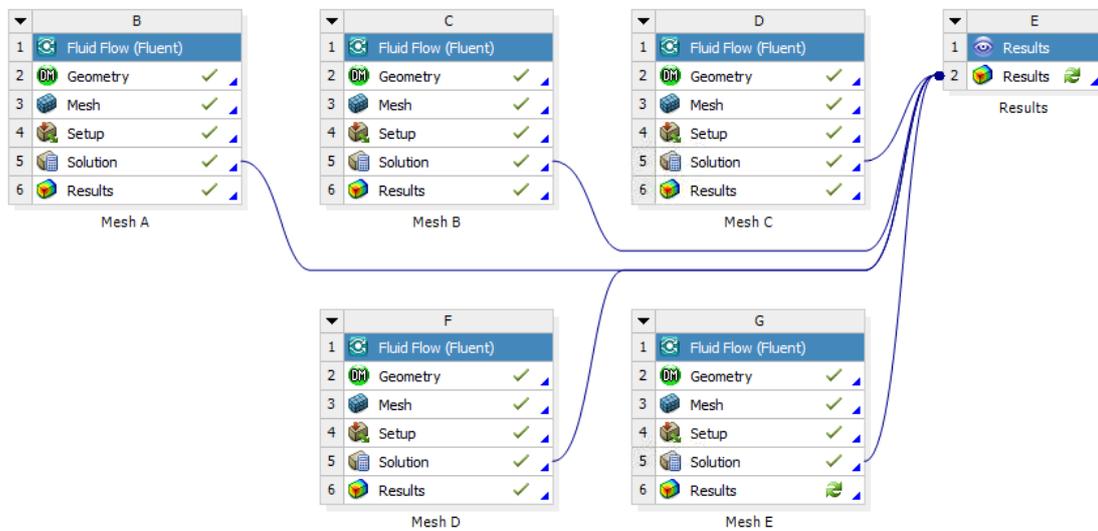


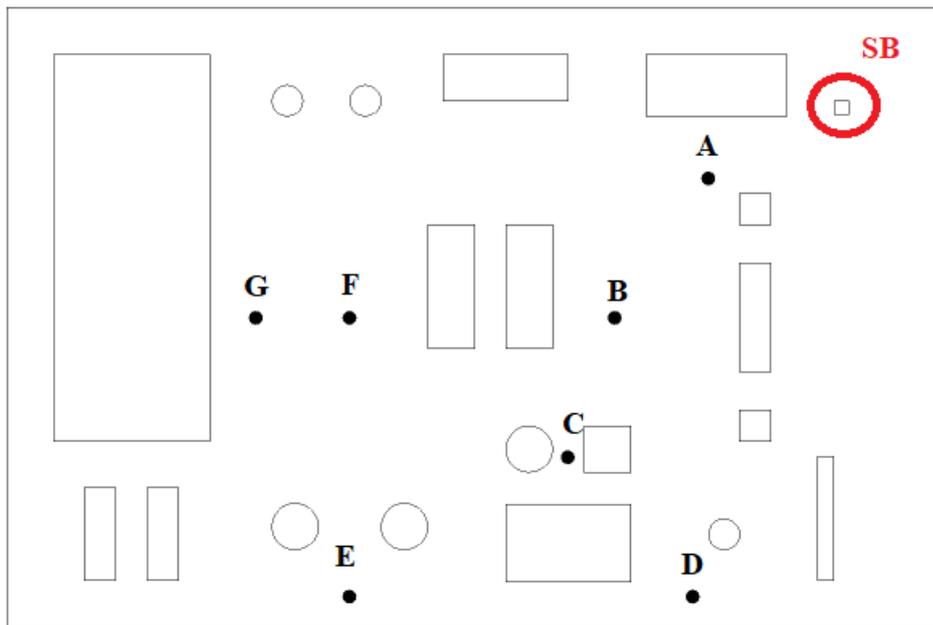
Figura 4.30: Simulazioni con griglie differenti

Come si nota dalla seguente Tabella 4.6 riassuntiva dei valori utilizzati nelle mesh, il numero di elementi cresce dalla mesh A alla mesh E.

	Zona A	Zona B	# Elementi
<b>Mesh A</b>	0.3	0.15	1.973.119
<b>Mesh B</b>	0.25	0.125	2.785.041
<b>Mesh C</b>	0.2	0.1	4.464.767
<b>Mesh D</b>	0.15	0.075	8.090.710
<b>Mesh E</b>	0.12	0.05	12.882.001

Tabella 4.6: Caratteristiche delle Mesh adottate

Per verificare l'indipendenza dalla griglia sono stati scelti inizialmente diversi **punti** significativi nel dominio di calcolo, in particolare sono stati scelti i punti evidenziati in Figura 4.31 ad un'altezza di due metri, alcuni dei quali vengono totalmente investiti dal flusso di metano rilasciato, altri sono stati più distanti e posti a valle di alcuni ostacoli presenti per valutare come incide la presenza dell'ostacolo e dunque la rifinitura della mesh attorno ad esso. Si è scelto di considerare il valore di velocità come parametro di riferimento.



*Figura 4.31: Localizzazione dei punti scelti nella piattaforma*

Nelle Figure dalla 4.32 alla 4.38 seguenti, sono rappresentati i grafici che rappresentano la variazione di velocità in dipendenza dalla mesh e dunque dal numero di elementi presenti, e gli errori relativi associati, valutati come:

$$err_{rel} = \frac{|v_{Mesh\ i} - v_{Mesh\ E}|}{v_{Mesh\ E}}$$

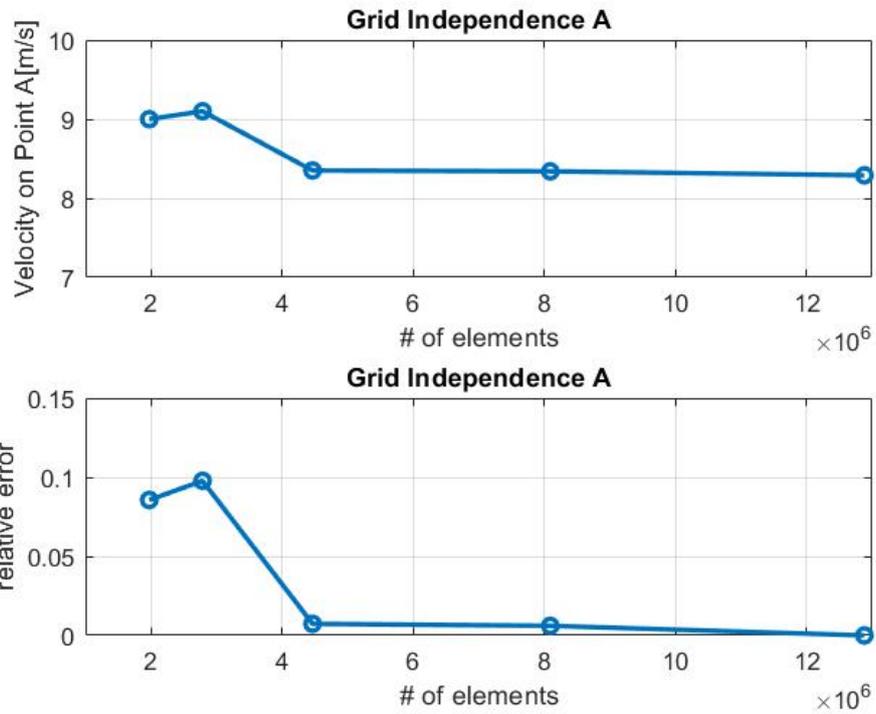


Figure 4.32: Grid Independence A

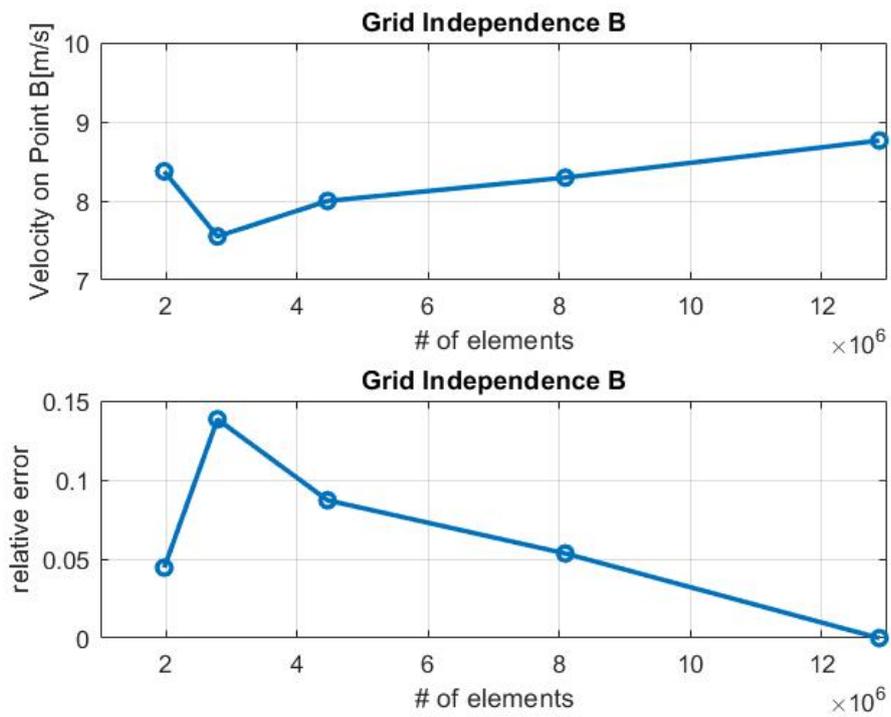


Figure 4.33: Grid Independence B

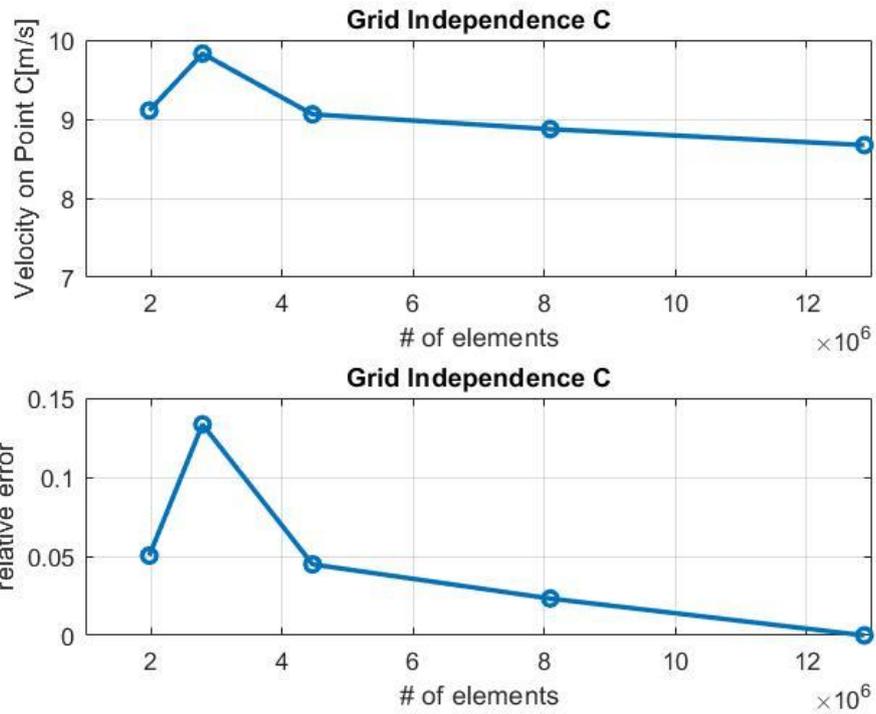


Figura 4.34: Grid Independence C

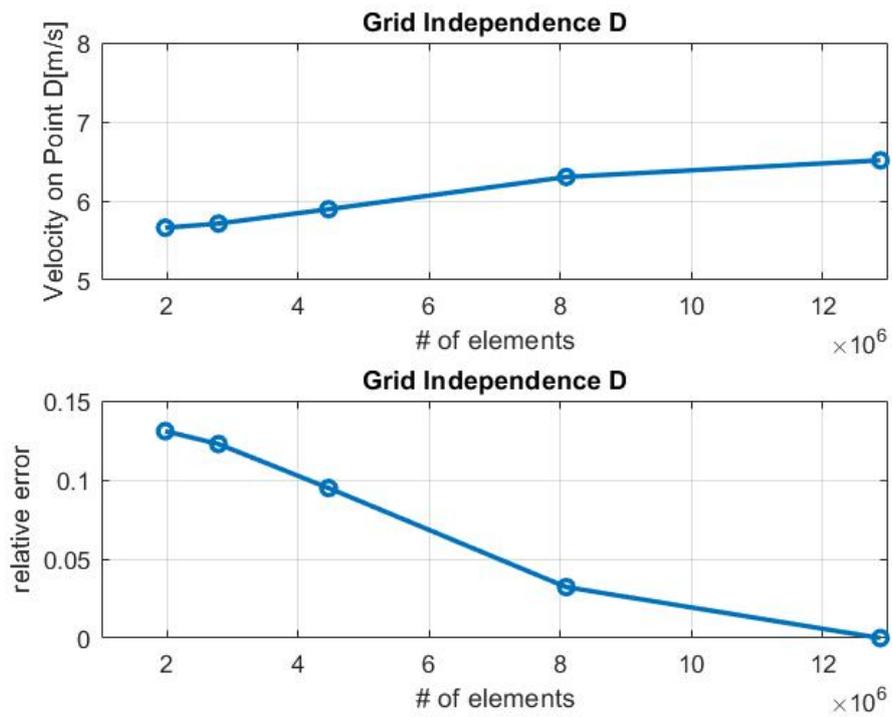


Figura 4.35: Grid Independence D

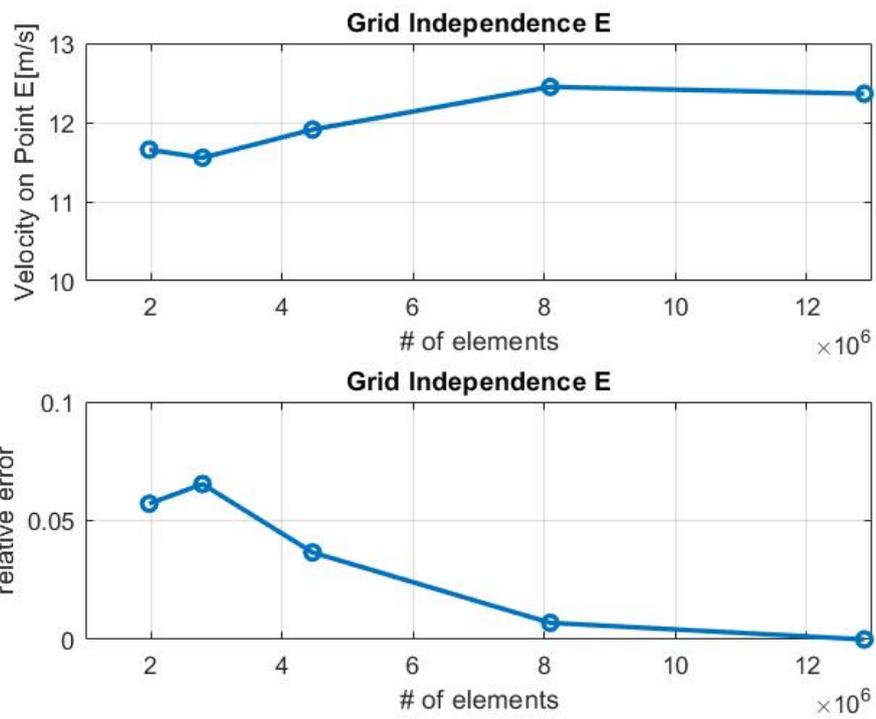


Figura 4.36: Grid Independence E

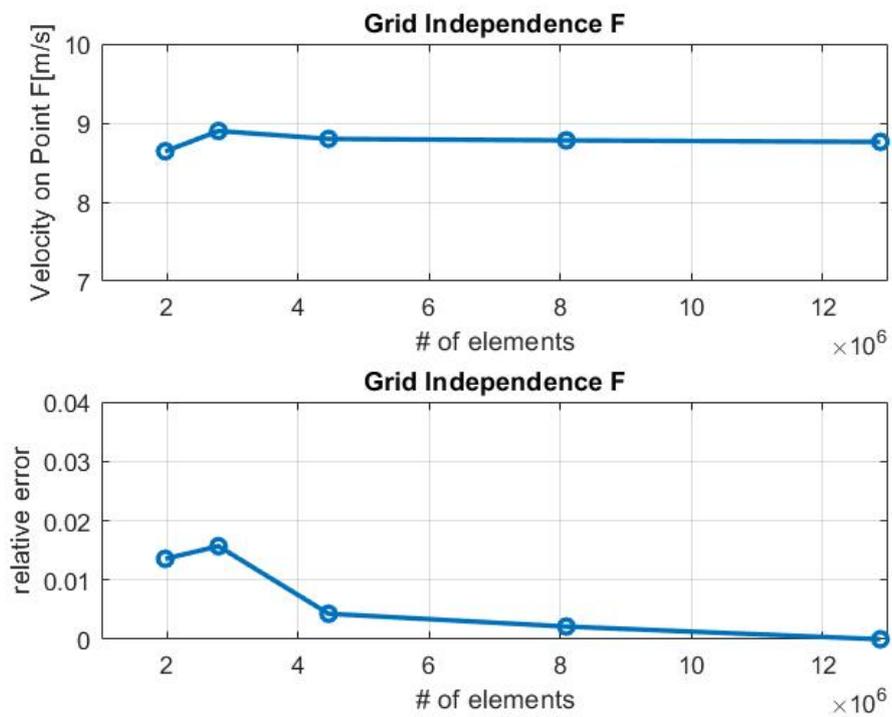


Figura 4.37: Grid Independence F

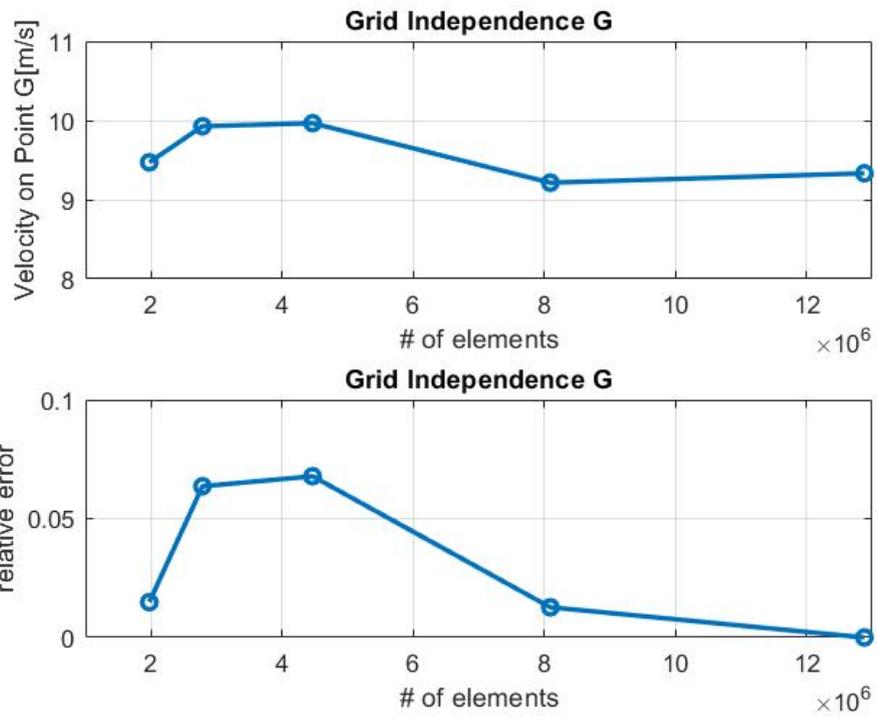
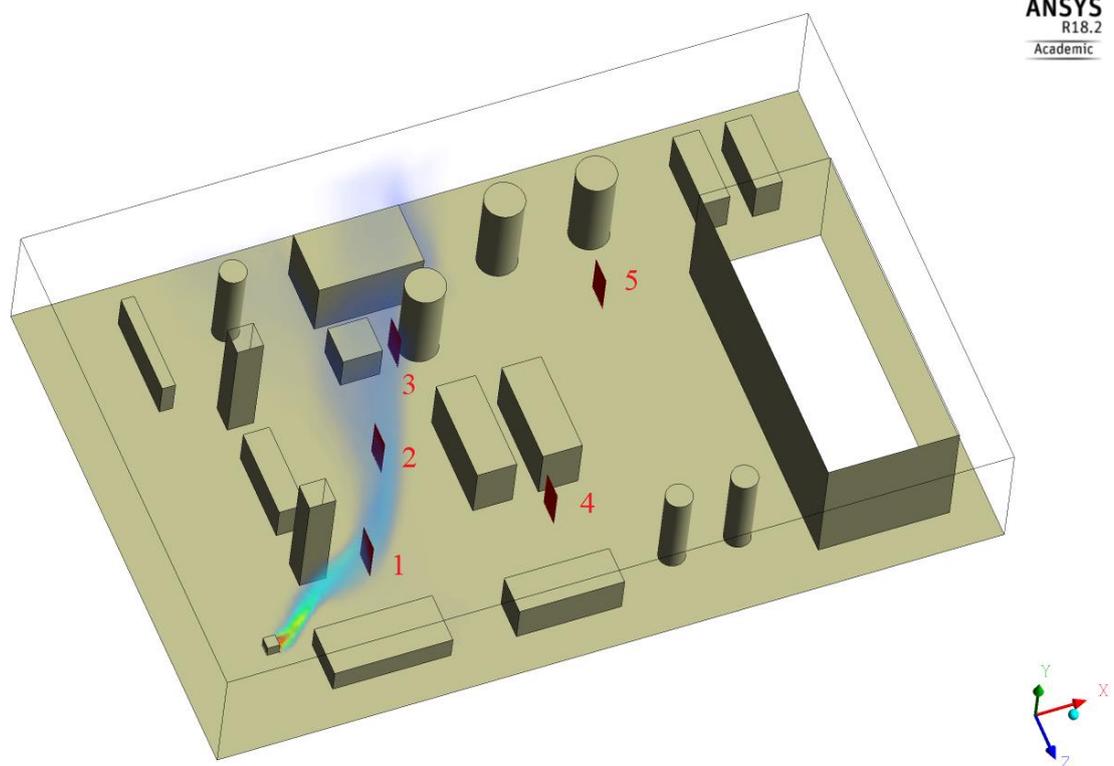


Figura 4.38: Grid Independence G

I valori puntuali sono tuttavia valori aleatori, dunque per valutare l'indipendenza dalla griglia si è scelto di considerare dei valori mediati sull'area di alcuni **piani**. Sono stati scelti diversi piani verticali posti all'interno del dominio e su di essi sono stati calcolati e mediati i parametri di interesse, in particolare i valori di  $\mu$  e di concentrazione. Le posizioni delle superfici considerate sono state scelte lontane da qualsiasi boundary condition che ne potrebbe influenzare i risultati.

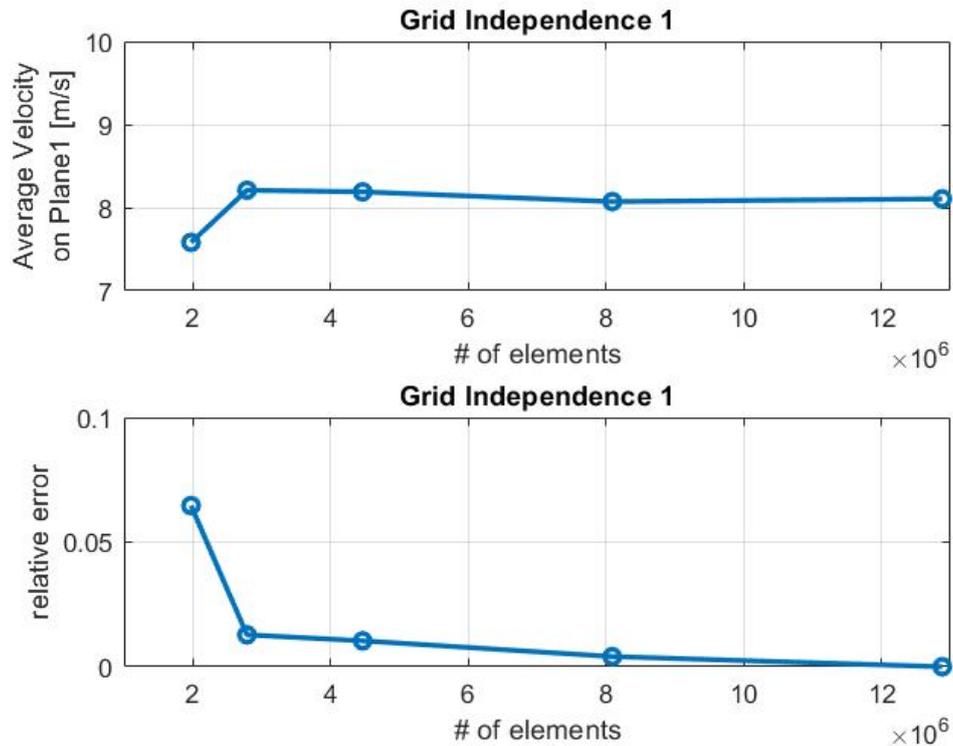
Come si può vedere nella Figura 4.39 sottostante sono stati analizzati i parametri di interesse su dei piani verticali di dimensioni pari a 1m x 2m, posti a distanza dal rilascio e che vengono investiti da esso.



*Figura 4.39: Localizzazione dei piani scelti nella piattaforma*

Considerando per esempio il *piano 1*, si sono riportati i grafici ottenuti analizzando il parametro velocità media sul piano al variare del numero di elementi presenti nel dominio di calcolo.

Nelle figure da 4.40 a 4.44 sono riportati gli errori relativi per le diverse mesh considerate, considerando come riferimento la mesh più fitta.



*Figura 4.40: Grid Independence Piano 1*

Considerando dei piani posti in differenti punti di interesse all'interno del nostro dominio, si può notare che la variazione del parametro di interesse diminuisce al variare della mesh. Si può notare infatti in Figura 4.40 che l'errore relativo diminuisce all'aumentare del numero degli elementi presente nel dominio di calcolo.

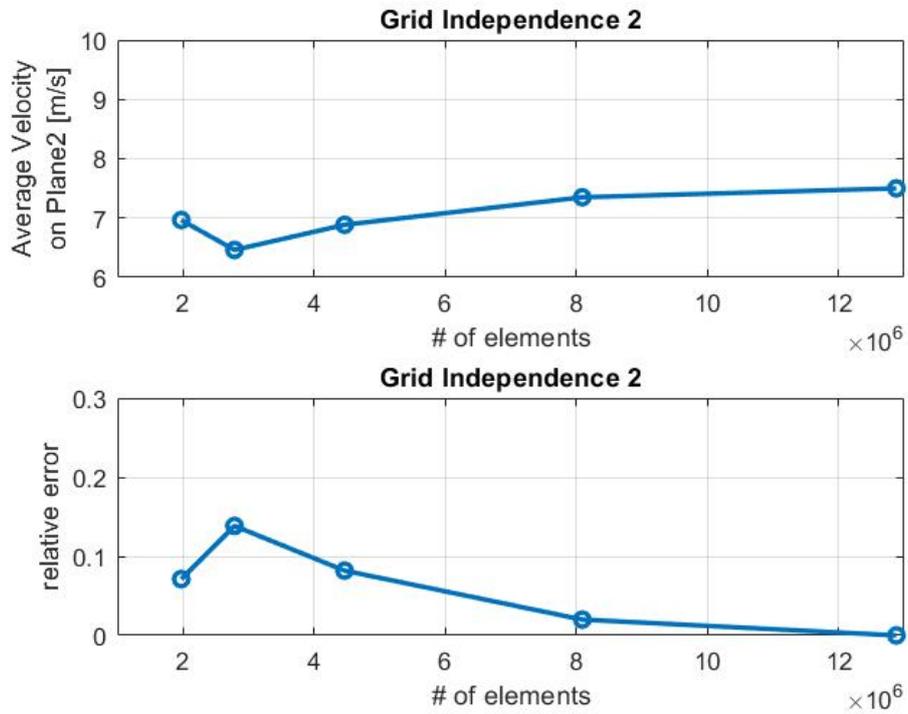


Figura 4.41: Grid Independence Piano 2

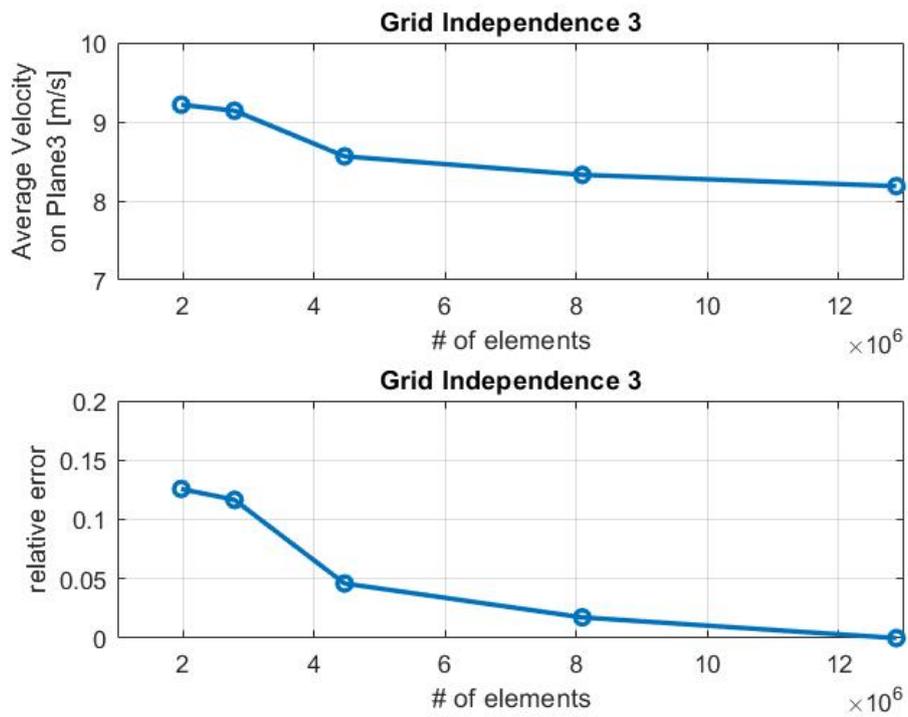


Figura 4.42: Grid Independence Piano 3

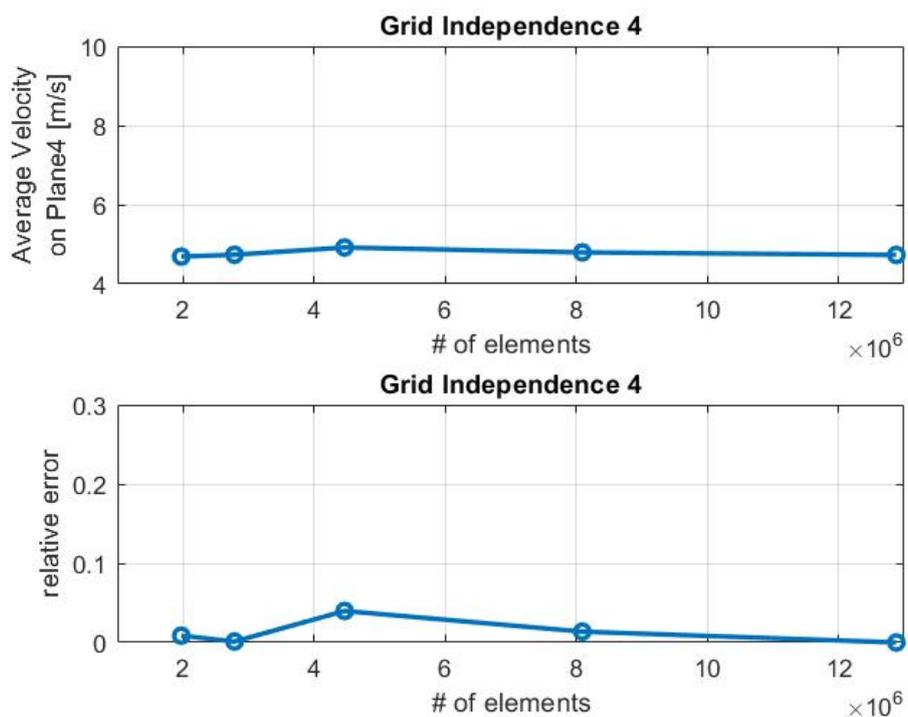


Figura 4.43: Grid Independence Piano 4

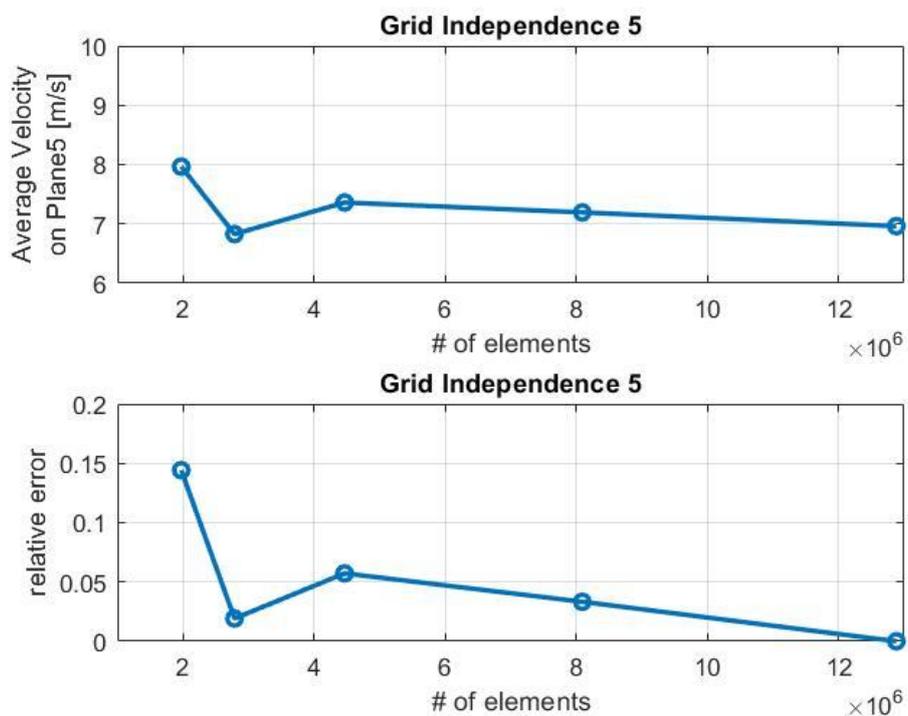


Figura 4.44: Grid Independence Piano 5

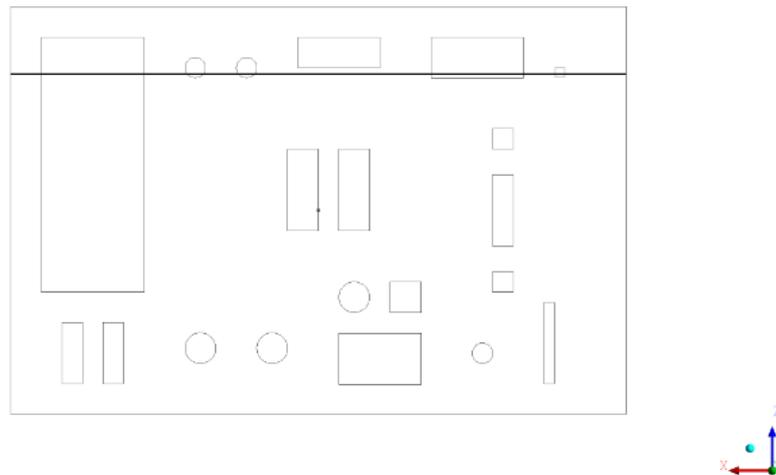
Per la scelta della mesh più adatta da utilizzare si è scelto di confrontare tramite un grafico e prendere dei valori di ginocchio dove i costi computazionali non risultino eccessivamente elevati.

La scelta della mesh deve garantire l'indipendenza della soluzione dalla griglia. In virtù della nostra analisi si è scelta dunque la mesh con un errore relativo percentuale, rispetto alla mesh più fitta considerata, di circa 1%, come si nota nelle Figure da 4.40 a 4.44.

Si è scelta dunque la mesh con le seguenti caratteristiche:

	Zona A	Zona B	#Elementi
Mesh C	0.2	0.1	4.464.767

*Tabella 4.7: Mesh scelta per le successive simulazioni*



*Figura 4.45: Linea per il confronto della mesh*

Confronto sulla linea, schematizzata in Figura 4.45 la mesh scelta con la mesh migliore, cioè più fitta.

Si può notare nelle Figure 4.46 e 4.47 come al variare della finitura della griglia, la velocità è sempre dello stesso ordine di grandezza con errori al di sotto dei 1%.

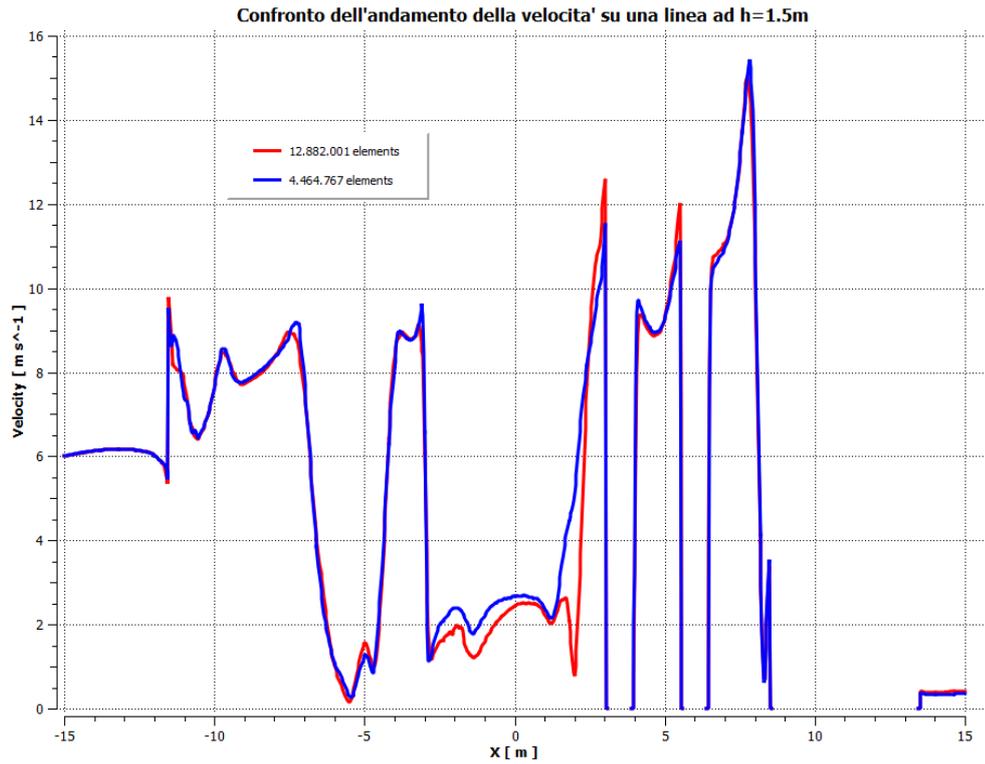


Figura 4.46: Confronto della velocità lungo la linea tra la mesh migliore e la mesh scelta

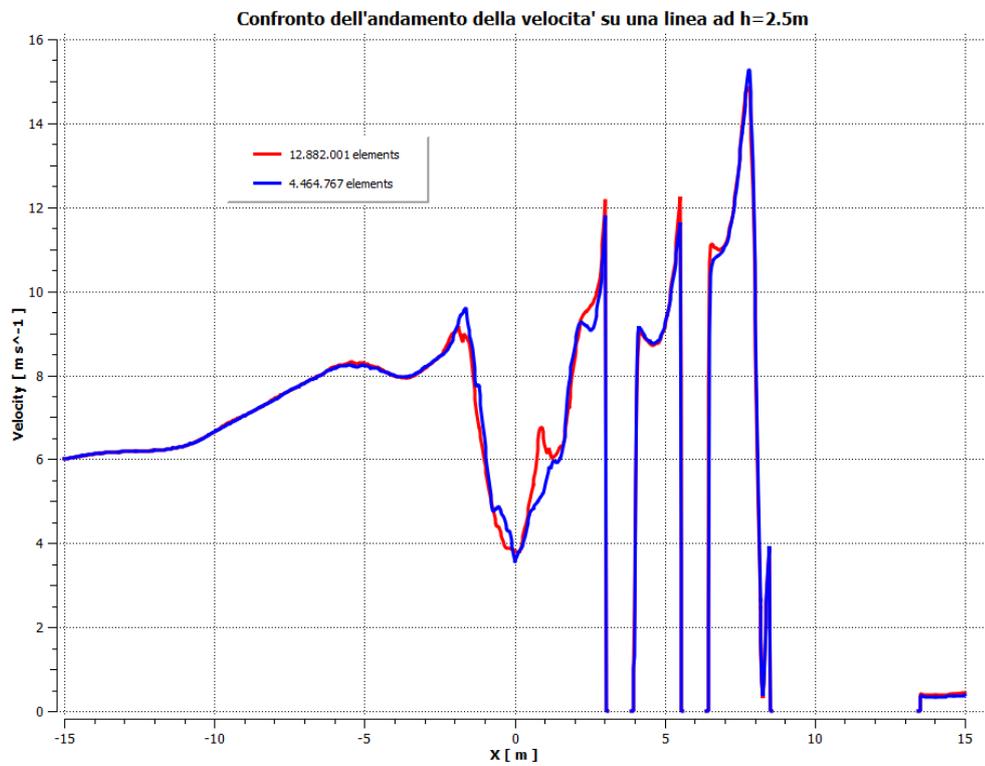


Figura 4.47: Confronto della velocità lungo la linea tra la mesh migliore e la mesh scelta

## 5. Simulazioni di dispersione e analisi critica dei risultati

Nelle simulazioni di dispersione la sostanza rilasciata tende naturalmente a diluire la propria concentrazione in aria. Lo studio delle dispersioni in atmosfera esamina la dinamica di nubi di vapori infiammabili e le concentrazioni raggiunte durante l'evoluzione dell'incidente.

È fondamentale predire dove vengono raggiunte le concentrazioni limite e come variano tali parametri al variare dei parametri di input. Nel caso di sostanze infiammabili è importante saper valutare dove vengono raggiunti i valori di concentrazione compresi tra i valori LFL e UFL, in modo da identificare dove possono avvenire fenomeni quali incendi o esplosioni.

I valori limite del range di infiammabilità del metano sono rappresentati in Tabella 5.1.

	LFL (%vol.)	UFL (%vol.)
Metano	5	15

*Tabella 5.1: Limiti di infiammabilità del metano*

Per predire gli effetti e le conseguenze di un dato incidente, si deve calcolare o stimare la velocità con cui il materiale sarà rilasciato e la quantità totale rilasciata in termini di massa o volume coinvolto. Il rilascio può avvenire in seguito alla rottura di una tubazione, di una valvola di sicurezza, ecc.

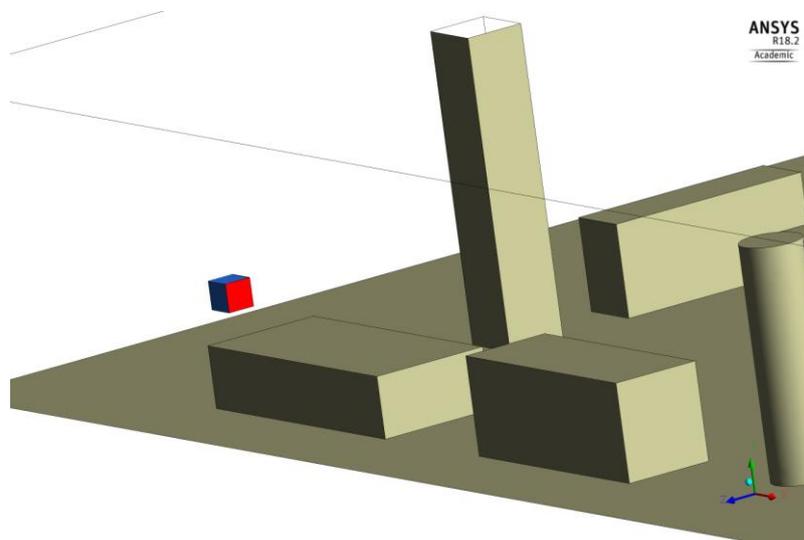
In particolare, è stata condotta un'analisi di sensitività dei dati di input necessari per condurre una simulazione di dispersione.

Nei paragrafi successivi verrà analizzata la sensibilità del modello a tre parametri di input:

- Variazione della concentrazione totale di sostanza infiammabile uniforme nel profilo
- Distribuzione delle concentrazioni sul profilo
- Variazione della velocità di rilascio.

## 5.1 Impostazione delle simulazioni

Come precedentemente trattato, la rottura è intesa come da una tubazione. Si fa l'ipotesi che la rottura avvenga ad una altezza dal suolo del production deck della piattaforma. Dunque, come è possibile vedere in Figura 5.1, la source box è posizionata a circa **1m** da terra. La source box è stata posizionata nell'angolo a **NW** della piattaforma con rilascio che ha la stessa direzione del vento in modo tale che, con la direzione del vento scelta, il rilascio investe tutta la piattaforma adottando dunque una scelta **conservativa**.



*Figura 5.1: Particolare della superficie della source box*

Si è scelto di fissare la dimensione della source box e la mesh scelta e di ripetere le simulazioni variando i parametri di concentrazione e velocità di rilascio del gas.

In seguito all'analisi fatta in 3.2 sulle superfici di maggiore interesse e avendo scelto di considerare solo il caso dell'impatto del getto supersonico con un cilindro all'interno della source box, si è considerata una sola superficie della source box (superficie rossa evidenziata in Figura 5.1) come regione di ingresso nel dominio considerato.

## 5.2 Descrizione dei casi studio

La prima analisi generale riguarda un rilascio con concentrazione 0.5 sulla superficie di rilascio della source box, valore con cui è stata svolta la grid independence.

I valori di velocità del vento e la sua direzione, una volta incanalata all'interno della piattaforma, considerata come struttura confinata, nel caso scelto sono mostrati nelle figure 5.2 e 5.3. La piattaforma è stata tagliata in piani ad altezza rispettivamente di  $y=1.23\text{m}$  e  $y=3.5\text{m}$  per rendere visibile la variazione di velocità anche a diverse altezze.

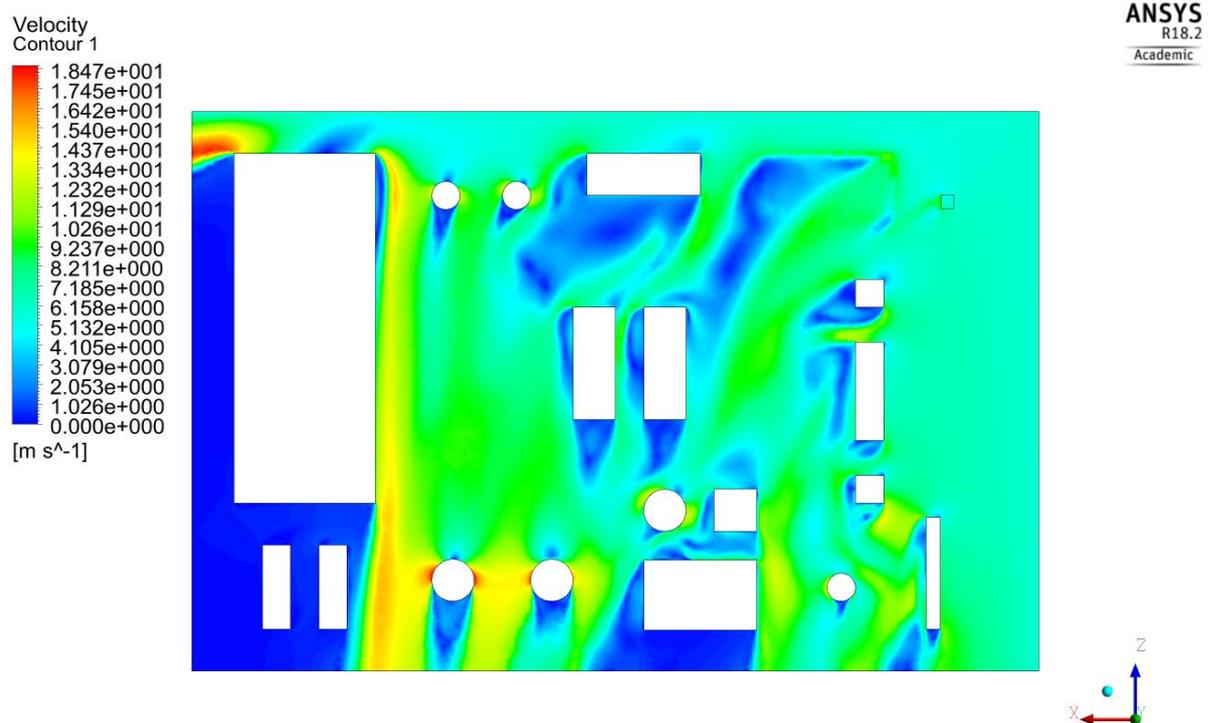


Figura 5.2: Valori della velocità su un piano di  $1.23\text{m}$

Le velocità raggiunte sono notevoli soprattutto nelle zone meno congestionate e nelle zone dove l'aria viene incanalata dopo aver subito un'accelerazione in seguito all'impatto con gli ostacoli.

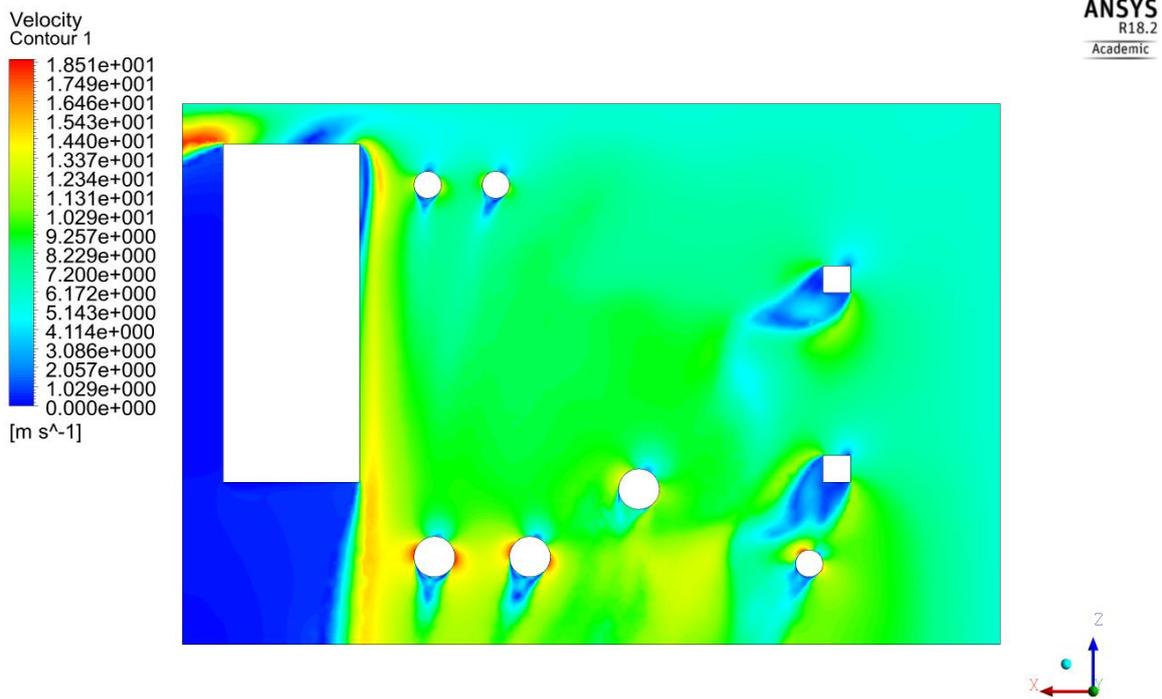


Figura 5.3: Valori della velocità su un piano di 3.5m

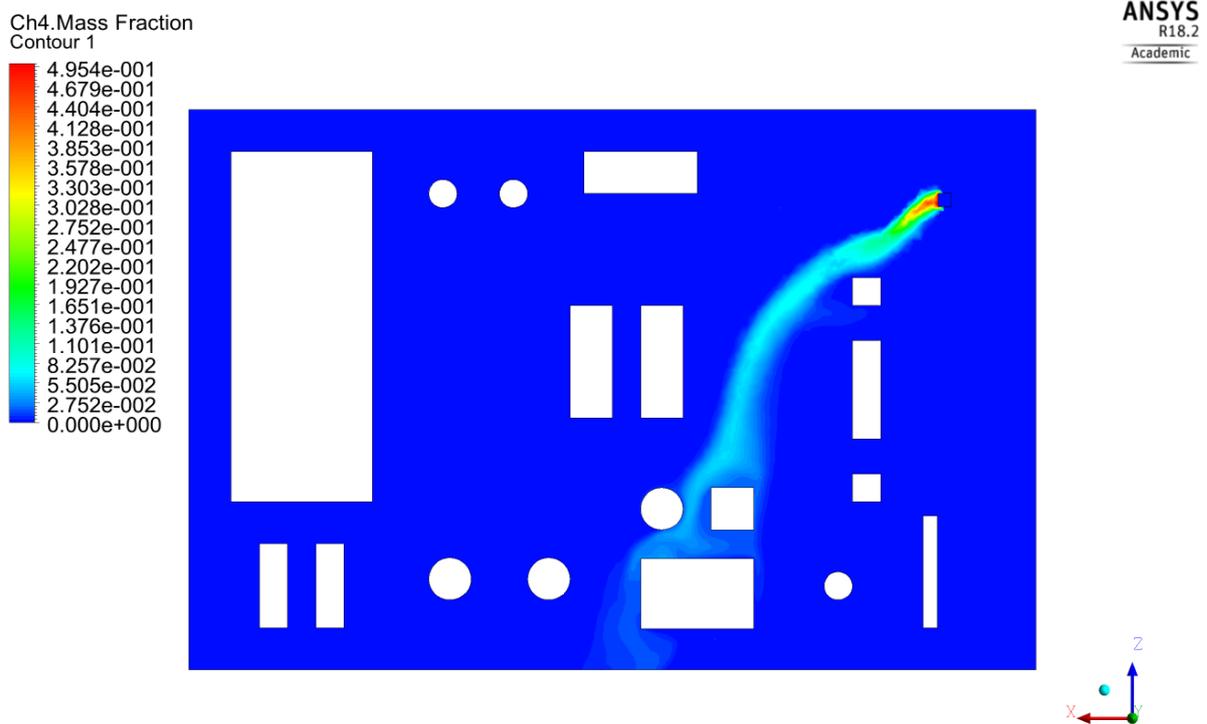
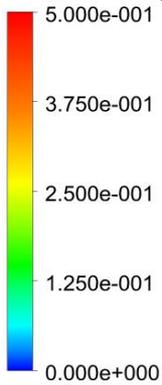
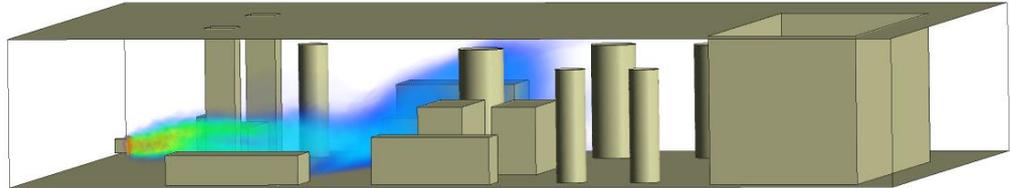


Figura 5.4: Visualizzazione delle concentrazioni di metano su un piano di 1.23m

Ch4.Mass Fraction  
Volume Rendering 1



ANSYS  
R18.2  
Academic



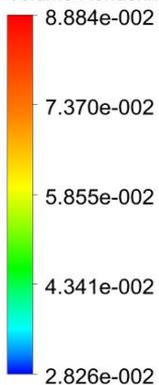
*Figura 5.5: Rilascio di metano*

In Figura 5.4 si ha una visualizzazione tridimensionale della frazione massica di gas metano all'interno del dominio con relativa legenda.

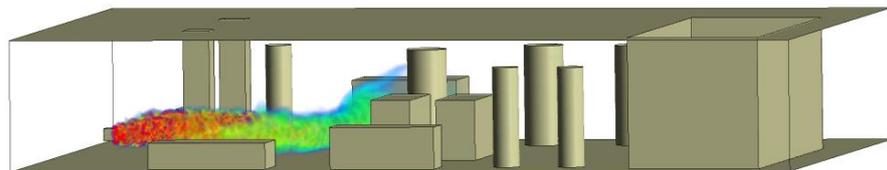
La concentrazione di metano diminuisce sensibilmente dopo aver impattato l'ostacolo che promuove il miscelamento in atmosfera.

La miscela di gas che rientra nel range di infiammabilità della sostanza, quale il metano è rappresentata in Figura 5.6.

Ch4.Mass Fraction  
Volume Rendering 1



ANSYS  
R18.2  
Academic



*Figura 5.6: Rilascio di metano: concentrazioni entro i limiti di infiammabilità*

## 5.2.1 Variazione della concentrazione totale di sostanza infiammabile uniforme sul profilo

Nel primo set di simulazioni, Figura 5.7, sono analizzati gli andamenti di velocità e di concentrazione del gas metano al variare del parametro di input, la concentrazione media su una faccia della source box. La faccia scelta è esposta a sud e viene completamente investita dal vento che proviene da nord ovest e ne favorisce il miscelamento con l'aria.

Sono stati presi in considerazione quattro valori di seguito elencati in Tabella 5.2.

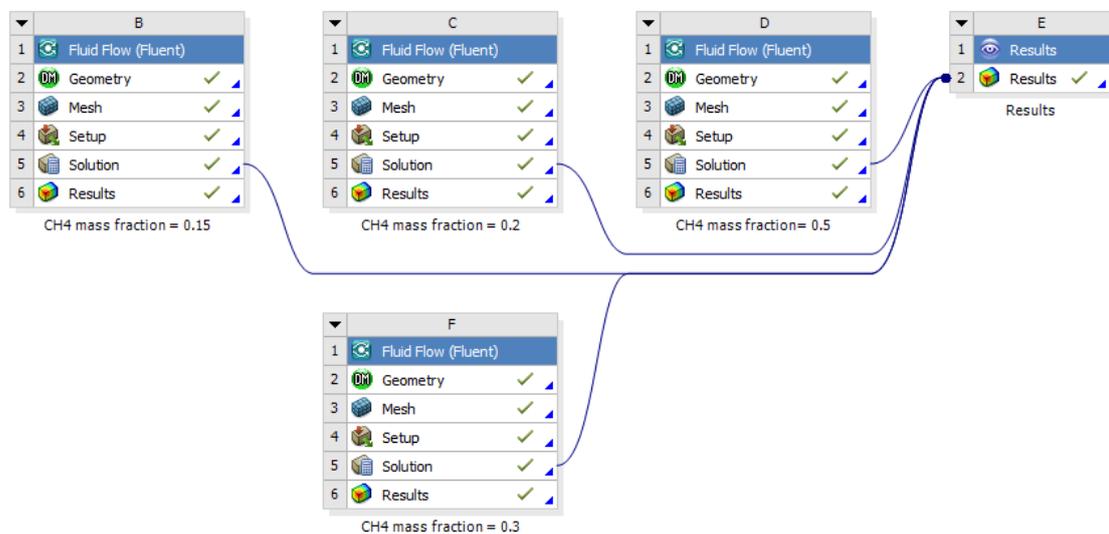


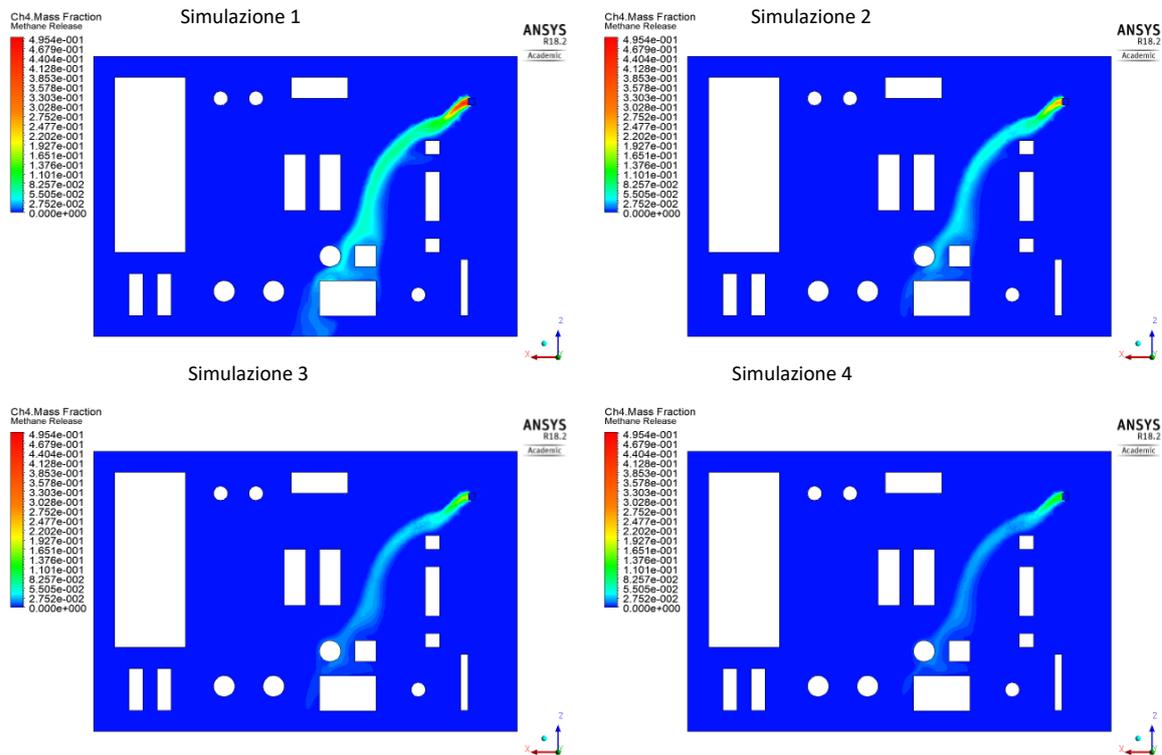
Figura 5.7: Primo set di simulazioni

Set di simulazioni	CH4 mass fraction
Simulazione 1	0.5
Simulazione 2	0.3
Simulazione 3	0.2
Simulazione 4	0.15

Tabella 5.2: Concentrazioni imposte sul profilo

Considerando un piano orizzontale della piattaforma ad una altezza di 1.23m, che divide esattamente la source box a metà, è possibile confrontare l'andamento del flusso di metano, in particolare in termini di frazione massica rispetto all'aria.

Si vuole ricordare che il vento viene simulato ad una velocità di 6m/s dunque risulta inferiore alla velocità di rilascio che è di 10m/s.



*Figura 5.8: Confronto di dispersione di metano all'interno del deck al variare della concentrazione di input*

Dalla Figura 5.8 si può dunque notare che il metano è rilasciato con concentrazioni massime di input differenti. Al diminuire della concentrazione di input diminuisce la concentrazione presente.

Nella successiva immagine, Figura 5.9, si riportano legende differenti per ciascuna simulazione (settate sull'intervallo di valori coperto in ciascun caso) in modo tale da evidenziare i valori ed il range di concentrazione al variare della concentrazione di input.

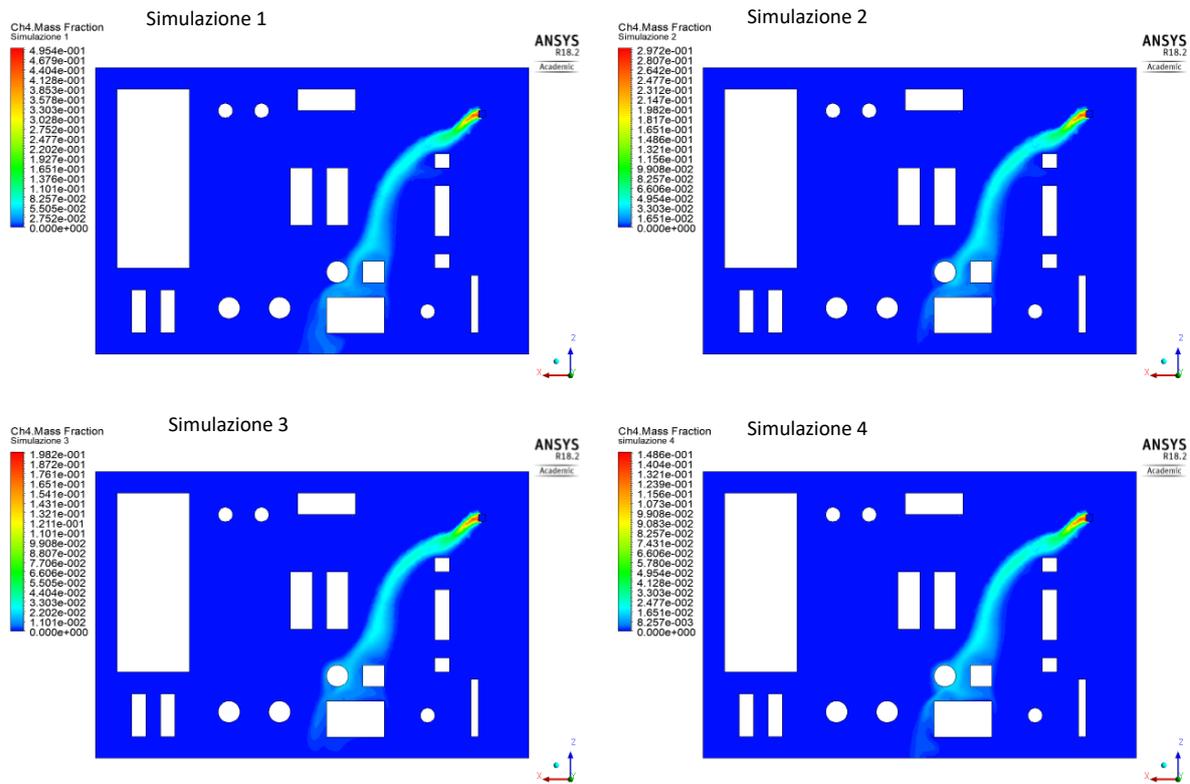


Figura 5.9: Confronto di dispersione di metano all'interno del deck al variare della concentrazione di input: legende differenti

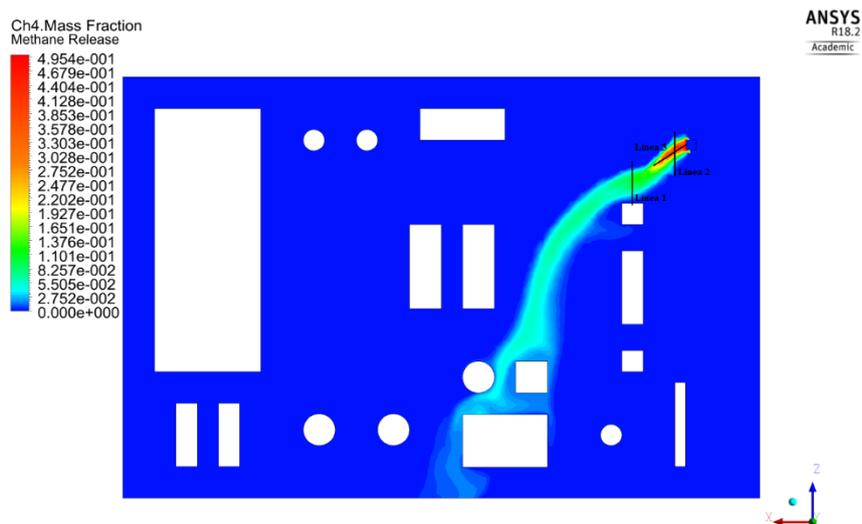


Figura 5.10: Linee scelte

Sono state considerate le tre linee rappresentate in Figura 5.10 e confrontati gli andamenti al variare della concentrazione media di input impostata sulla superficie di rilascio.

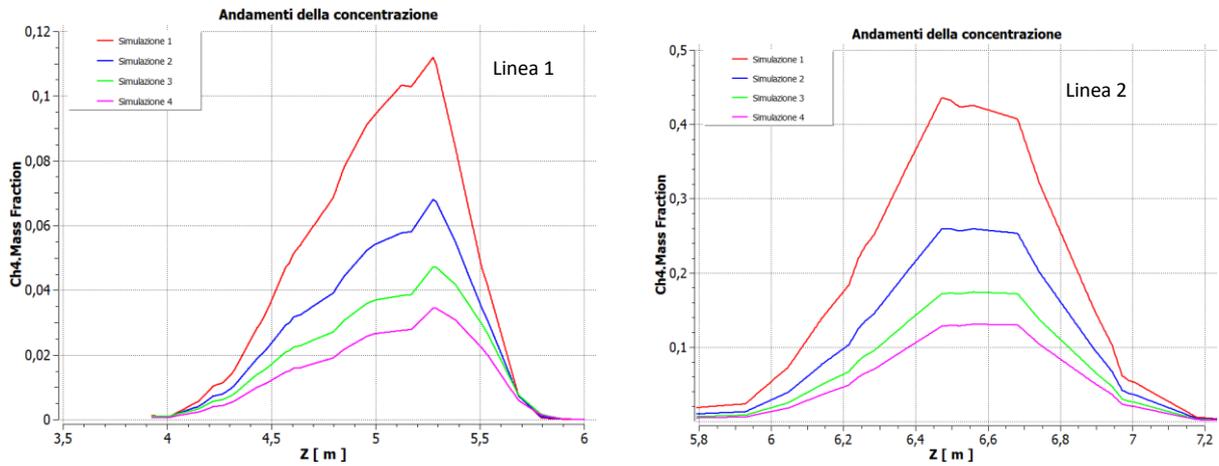


Figura 5.11: andamenti della concentrazione lungo le Linee 1 e 2 al variare della concentrazione media di input

Andando ad analizzare la linea lungo l'asse, la linea 3 in Figura 5.12, si nota in particolare come al diminuire della concentrazione di input la concentrazione diminuisce ma diminuisce anche la pendenza delle curve.

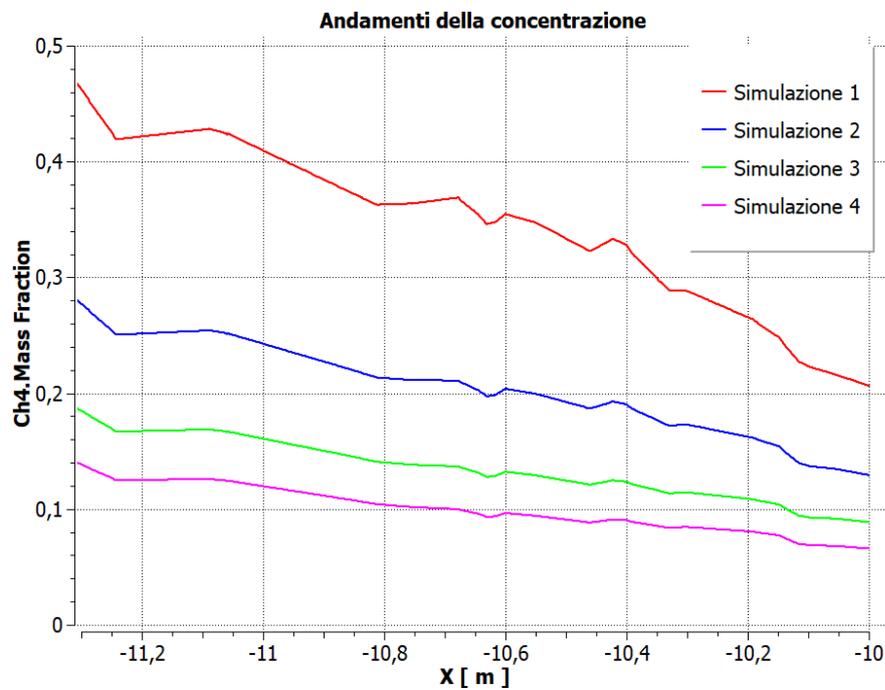
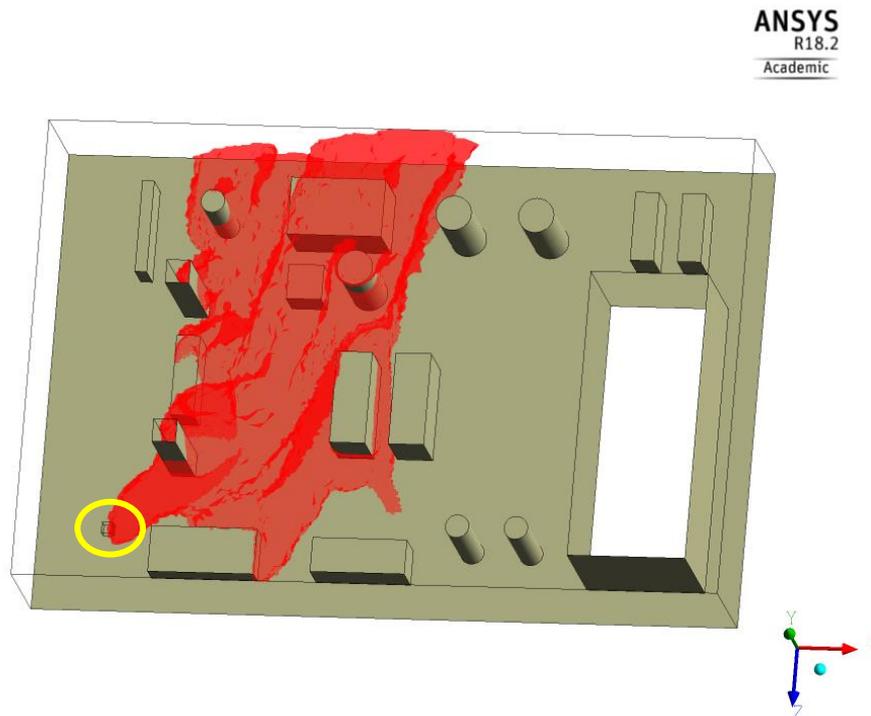


Figura 5.12: Andamenti della concentrazione lungo la Linea 3 al variare della concentrazione media di input

Per un'analisi più approfondita si è scelto di analizzare l'andamento del volume coinvolto all'interno della piattaforma ed eventuali aree raggiunte.

In Figura 5.13 è riportata l'immagine qualitativa della vista tridimensionale dall'alto della nube di gas metano che si crea all'interno nel deck della piattaforma. Questa impatta dunque con diversi ostacoli presenti all'interno del deck di produzione che ne riducono la velocità e ne promuovono il miscelamento con l'aria.



*Figura 5.13: Volume di metano rilasciato*

Comparando i volumi di sostanza rilasciata nelle differenti simulazioni descritte in Tabella 5.2, in Figura 5.13 si nota che al variare della concentrazione di input impostata sulla superficie della source box, varia il volume coinvolto. In particolare, all'aumentare della concentrazione di input sul profilo aumenta linearmente il volume di metano presente all'interno del deck di produzione. Tale risultato è interessante poiché convalida le simulazioni impostate.

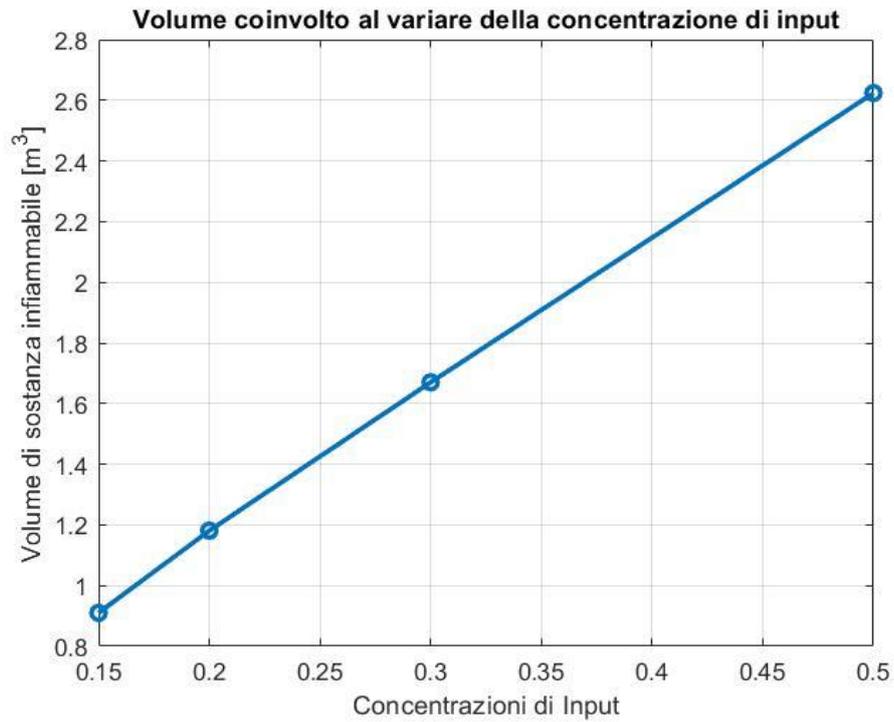


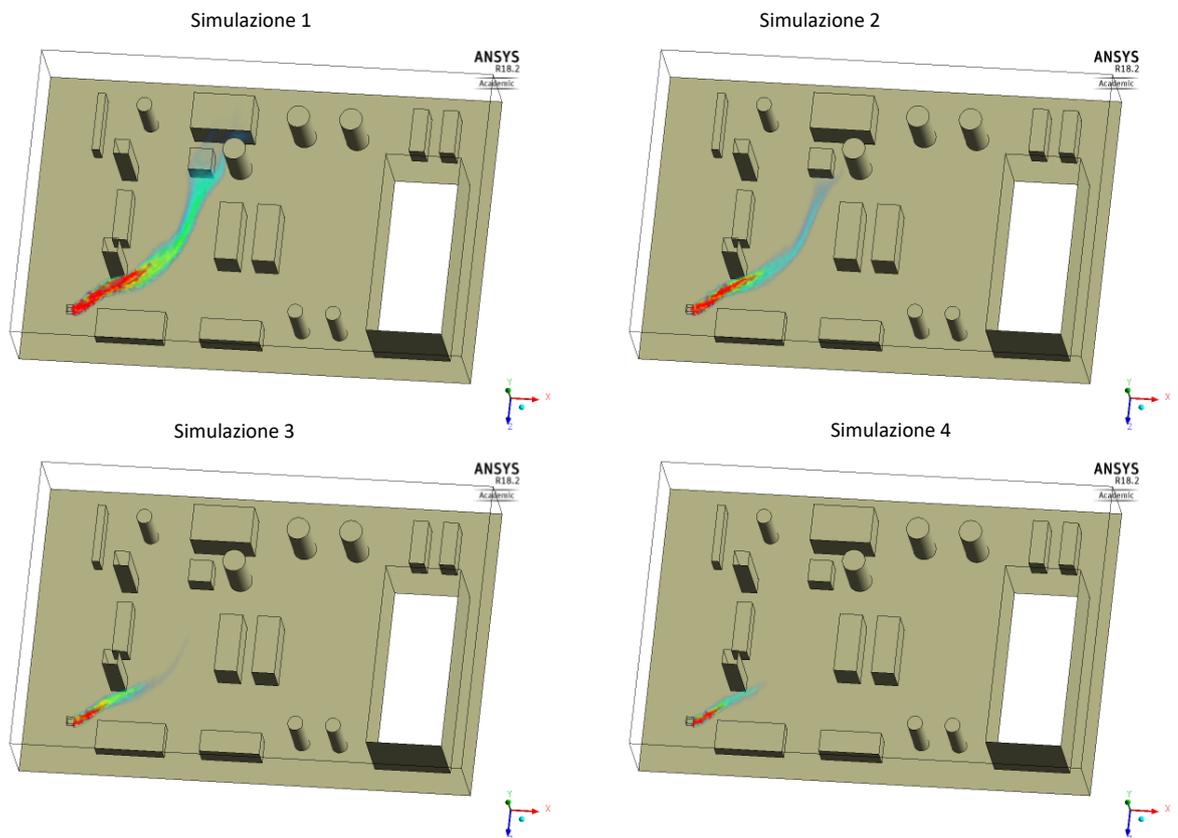
Figura 5.14: Volume al variare delle concentrazioni di input

Nella Tabella 5.3, sono stato analizzati i volumi di gas metano relativi alle 4 simulazioni che rientrano nel range di infiammabilità della sostanza.

Set di simulazioni	CH4 mass fraction	Volume coinvolto entro i limiti di infiammabilità [m3]
Simulazione 1	0.5	1.35
Simulazione 2	0.3	0.69
Simulazione 3	0.2	0.32
Simulazione 4	0.15	0.18

Tabella 5.3: Volumi coinvolti

I volumi coinvolti considerando valori di concentrazione entro i limiti di infiammabilità sono mostrati qualitativamente nella Figura 5.15.



*Figura 5.15: Volumi nel range di infiammabilità*

I volumi coinvolti sono inferiori rispetto al caso precedente poiché sono limitati ai valori di concentrazione che rientrano nei limiti di infiammabilità della sostanza e coinvolgono aree ridotte molto ridotte. Dal punto di vista quantitativo i valori ottenuti sono stati misurati e riportati su un grafico in Figura 5.16.

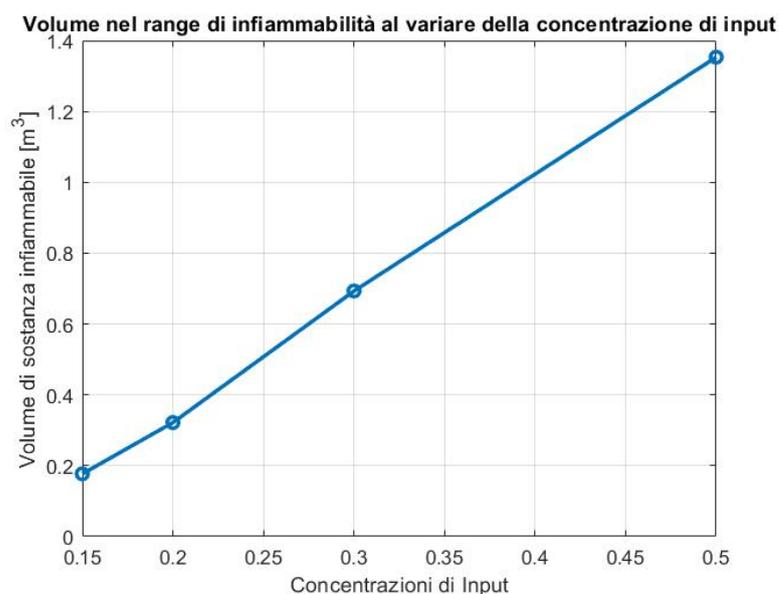


Figura 5.16: Volume al variare delle concentrazioni di input

Anche in questo caso il grafico ottenuto sottolinea dunque la dipendenza lineare tra i parametri di concentrazione iniziale e volume di sostanza infiammabile.

Quantitativamente si può notare che passando da concentrazioni totali sul profilo da 0.15 a 0.2 il volume coinvolto ha un aumento del 82%. Tali percentuali aumentano all'aumentare della concentrazione fino ad avere un volume finale, nel caso di concentrazione pari a 0.5, che risulta essere circa 8 volte il volume iniziale.

Per quanto riguarda le aree della piattaforma coinvolte, si ha una diminuzione dell'area coinvolta al diminuire della concentrazione di input. I valori ricavati sono elencati in Tabella 5.4.

CONCENTRAZIONE	AREA [m2]
0.5	36
0.3	28
0.2	24
0.15	12

Tabella 5.4: Aree coinvolte al variare della concentrazione di input

Ricordando che il nostro dominio di calcolo, il deck di produzione, ha un'area complessiva di 600 m<sup>2</sup>, nel caso di rottura di una pipeline è coinvolto solo il 6% dell'area totale nel caso di maggiore concentrazione.

## 5.2.2 Distribuzione della concentrazione sul profilo

Si vuol far presente che, realisticamente, prendendo in considerazione la concentrazione di metano sulla superficie della source box scelta, questa avrà una certa distribuzione e non risulterà omogenea su tutta la faccia, come mostrato in Figura 5.17 dove è rappresentata solo un quarto del profilo di frazioni massiche ottenuto in [9].

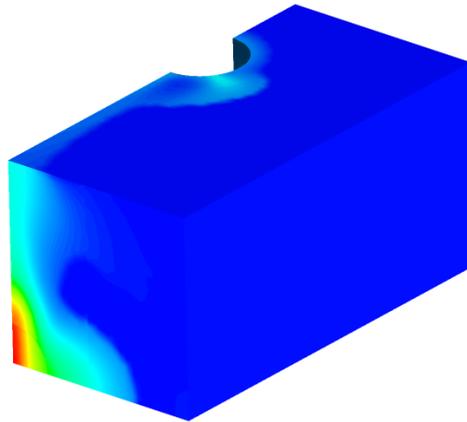


Figura 5.17: Concentrazioni sulle superfici della source box [9]

Per tenere in considerazione la variazione della concentrazione sulla faccia e soprattutto come variano conseguentemente i risultati in base a questa suddivisione e non omogeneità presente sulla superficie, si è scelto di suddividere la faccia considerata in 16 parti e ad ogni parte è stato associato un peso prendendo come riferimento i risultati ottenuti in [9].

Si è scelto di suddividere la faccia considerata in 16 parti ad ogni parte è stato associato un peso, come esposto in Figura 5.18, l'integrale della concentrazione del profilo è mantenuto pari ai casi considerati con distribuzione uniforme. Si tratta dunque di distribuzioni con valori spalmati, ma mantenendo l'integrale totale della concentrazione.

0	3	3	0
2	5	5	2
2	5	5	2
0	3	3	0

Figura 5.18: Distribuzione della concentrazione sulle superfici della source box tramite pesi

L'analisi fatta per associare ad ogni peso una data concentrazione si è svolta considerando una concentrazione in ppm/m<sup>3</sup>,  $C_{media}$ . La concentrazione la si deve moltiplicare per l'area di riferimento,  $A_{tot}$ . L'area di riferimento è considerata come 16 volte l'area unitaria che nel caso di source box analizzato è una superficie di 0.46x0.46m<sup>2</sup>. La concentrazione risultante  $C_{elem}$  [ppm/m] la si moltiplica per il peso e l'area della singola faccetta,  $C_1$ . Le operazioni svolte sono elencate di seguito:

$$C_m \left[ \frac{ppm}{m^3} \right] \qquad C_{elem} \left[ \frac{ppm}{m} \right]$$

$$C_{elem} = C_m * A_{tot} = C_m * 16 * A_{elem}$$

$$C_1 = \frac{C_{elem} * peso}{A_{elem}} = \frac{C_{elem} * 16 * A_{elem} * peso}{A_{elem}}$$

Per ogni concentrazione totale sono state considerate tre differenti simulazioni con differenti pesi, il peso massimo viene affidato alla parte centrale del profilo dove si ottengono delle concentrazioni più elevate:

Simulazione 1

0	3	3	0
2	5	5	2
2	5	5	2
0	3	3	0

Simulazione 2

0	4	4	0
1	5	5	1
1	5	5	1
0	4	4	0

Simulazione 3

0	3	3	0
1	6	6	1
1	6	6	1
0	3	3	0

Figura 5.19: Simulazioni con profili differenti

Le precedenti simulazioni fatte con un'unica concentrazione sulla faccia sono state comparate ai risultati ottenuti suddividendo la faccia nei tre casi elencati.

Si è fatta un'analisi con concentrazione media di 0.15 sulla faccia confrontando i risultati ottenuti nel caso in cui la concentrazione è distribuita in maniera omogenea con le differenti distribuzioni sopra descritte. Si sono confrontati gli andamenti ottenuti nei diversi casi comparando gli andamenti delle linee ad un'altezza di 2m rappresentate in Figura 5.18.

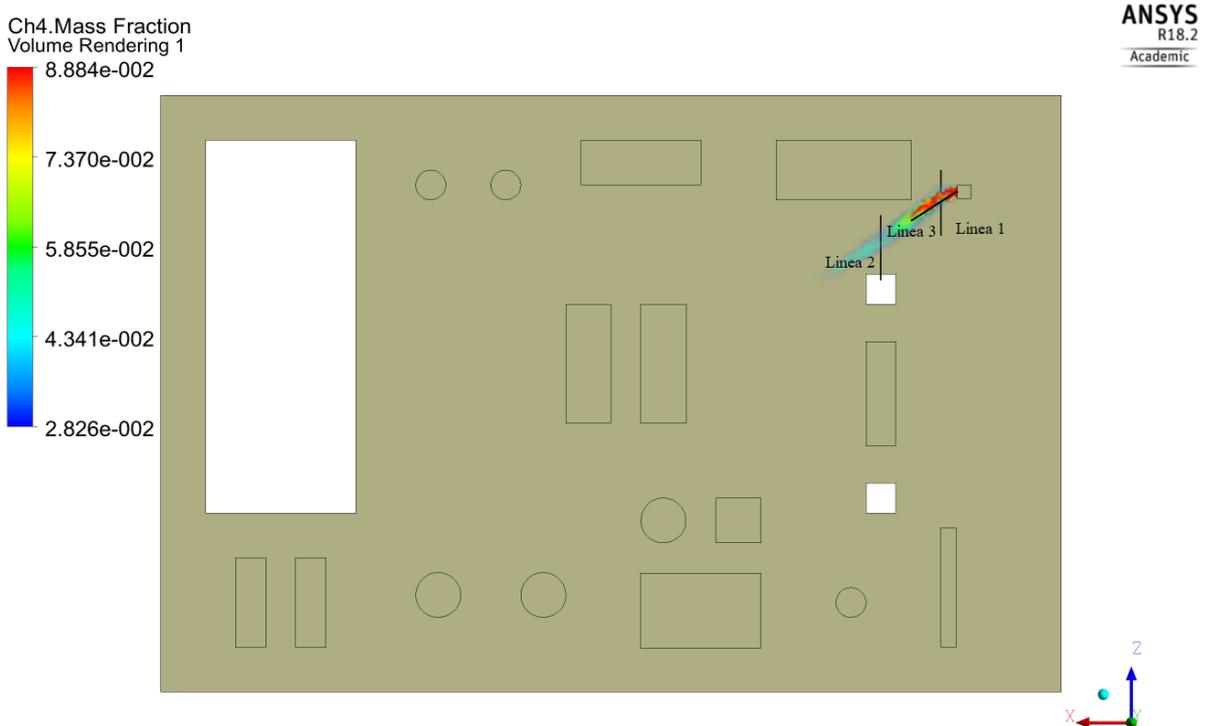


Figura 5.18: Linee per comparare i casi simulati

Le figure 5.19, 5.20 e 5.21 mostrano, sulle linee mostrate in figura 5.18, l'andamento delle concentrazioni. La simulazione denominata simulazione0 è la simulazione effettuata considerando una concentrazione uniforme nel profilo, in questo caso pari a 0.15.

Le simulazioni 1, 2 e 3 sono le simulazioni effettuate considerando le distribuzioni rappresentate in figura 5.19.

In Figura 5.21 si nota come l'andamento iniziale delle concentrazioni nei tre casi di concentrazioni distribuite ha valori più alti, ciò è dovuto al fatto che mantenendo l'integrale della concentrazione costante si hanno delle concentrazioni più elevate al centro del profilo.

La distribuzione delle concentrazioni permette che queste siano dunque spalmate e decrescono più velocemente rispetto alla concentrazione uniforme.

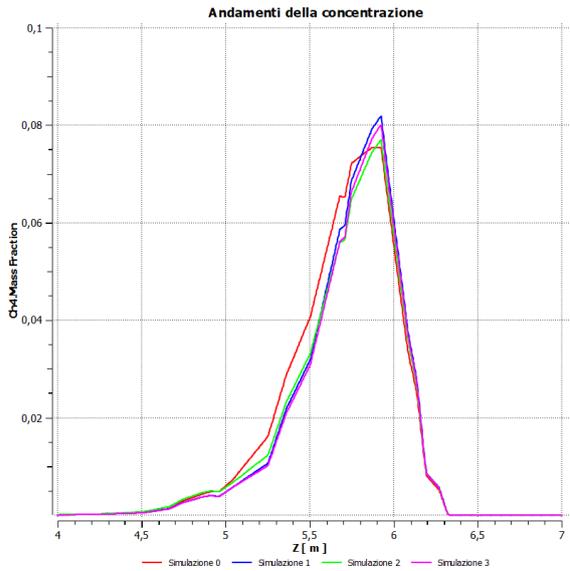


Figura 5.19

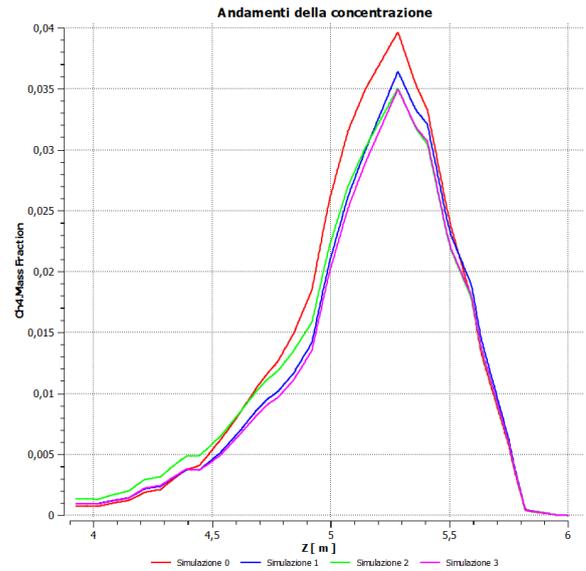


Figura 5.20

Confronto dell'andamento della concentrazione rispettivamente sulla linea 1 e sulla linea 2 al variare della distribuzione sul profilo

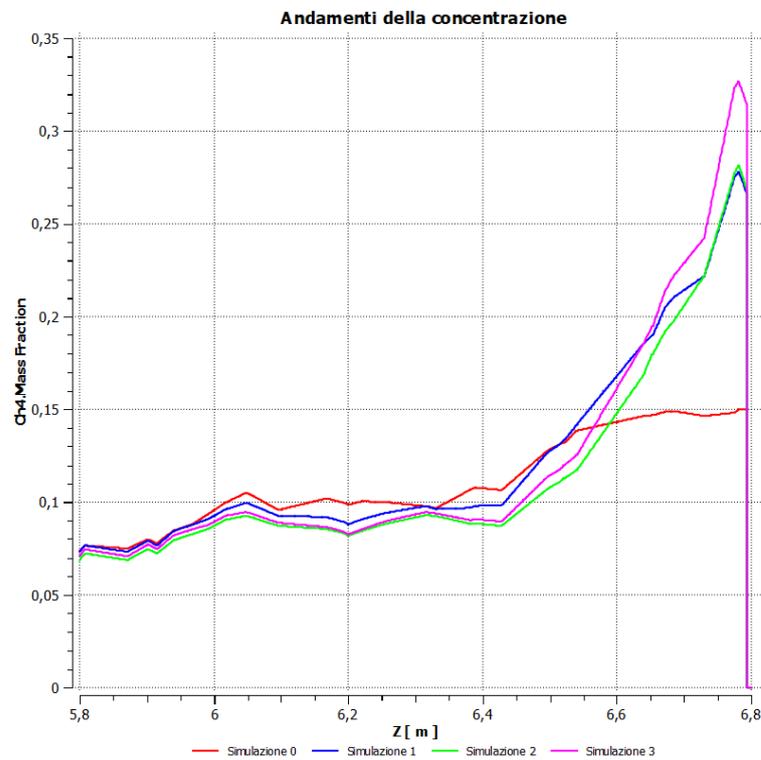


Figura 5.21: Confronto dell'andamento della concentrazione sulla linea 3 al variare della distribuzione sul profilo

I volumi coinvolti sono stati comparati ai risultati ottenuti nel caso in cui le simulazioni hanno profili omogenei di concentrazione (Simulazione 0).

Considerando la prima distribuzione in Figura 5.22, dal punto di vista quantitativo i valori ottenuti sono stati misurati e riportati su un grafico Figura 5.23.

0	3	3	0
2	5	5	2
2	5	5	2
0	3	3	0

Figura 5.22: Simulazione 1

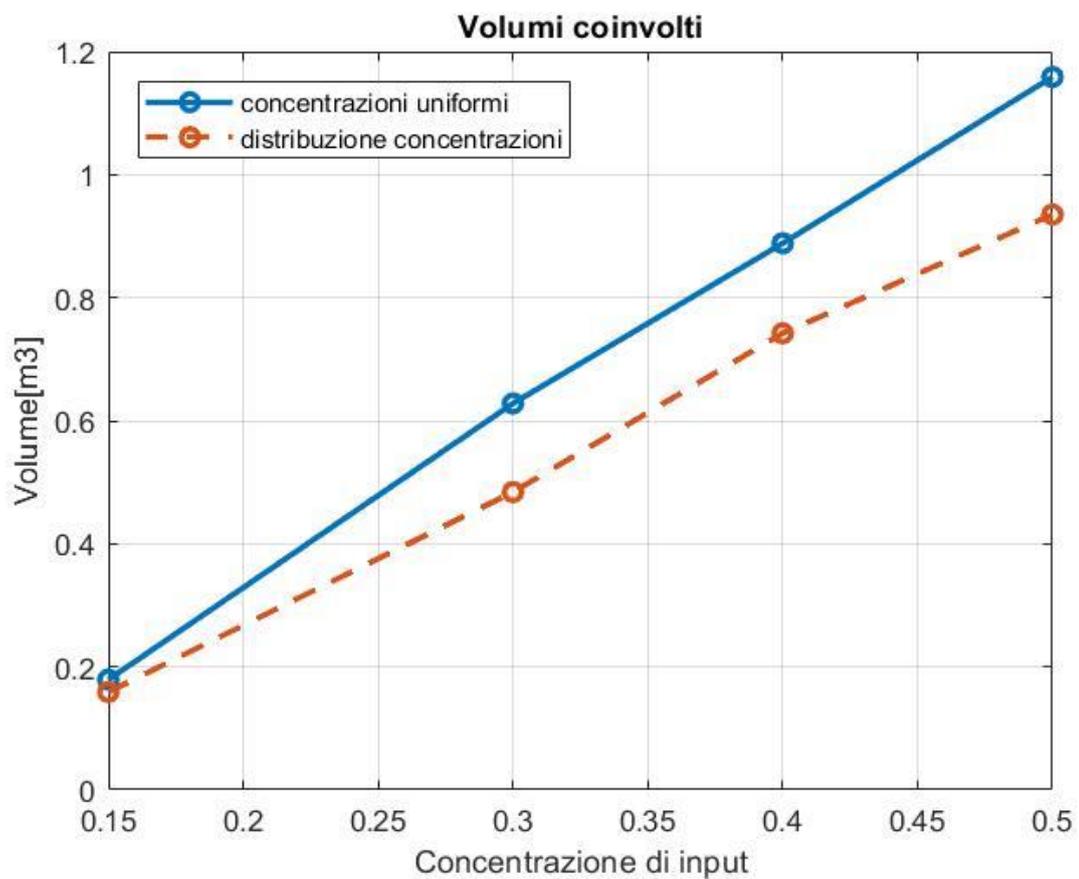


Figura 5.23: Confronto dei volumi coinvolti

Dal grafico si può notare che, considerando come concentrazione integrale i casi elencati in Tabella 5.3, si ha una riduzione passando dalla concentrazione uniforme ad una concentrazione distribuita. I valori numerici di diminuzione sono elencati in Tabella 5.5.

<b>CH4 mass fraction integrale</b>	<b>Volume coinvolto entro i limiti di infiammabilità, Concentrazioni uniformi[m3]</b>	<b>Volume coinvolto entro i limiti di infiammabilità Concentrazioni distribuite [m3]</b>
0.5	1.16	0.93
0.4	0.888	0.74
0.3	0.628	0.48
0.15	0.179	0.16

*Tabella 5.5: Volumi coinvolti al variare della concentrazione di input nel caso di concentrazione uniforme e concentrazione distribuita*

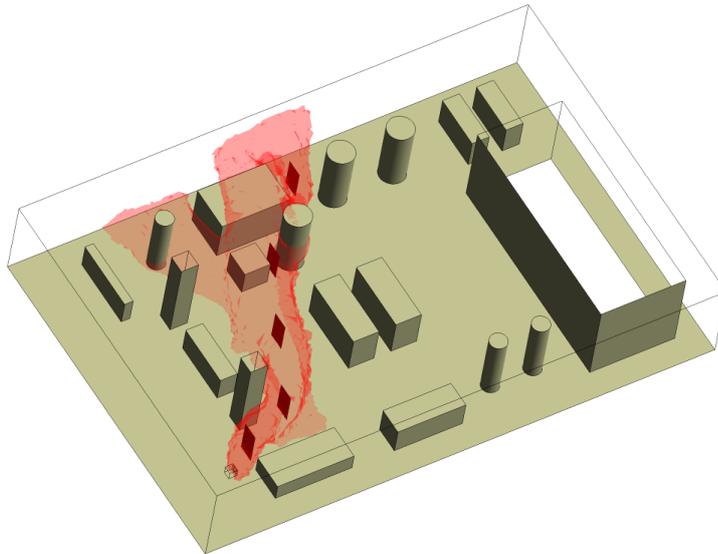
A livello percentuale si ottengono dei risultati incoraggianti, mostrati in Tabella 5.6.

<b>CH4 mass fraction integrale</b>	<b>Diminuzione percentuale di volume coinvolto [%]</b>
0.5	19
0.4	16
0.3	23
0.15	11

*Tabella 5.6: Diminuzione percentuale del volume coinvolto*

Passando dunque da una concentrazione omogenea ad una distribuzione sul profilo, diminuiscono i volumi che rientrano nei limiti di infiammabilità della sostanza. Questo è dovuto al gradiente di concentrazione già di per sé presente nel profilo e al fenomeno di miscelamento con l'aria che diluiscono i volumi coinvolti diminuendo i le quantità che rientrano nel range di infiammabilità della sostanza.

È dunque importante andare ad investigare tale fenomeno distribuendo in maniera più realistica le concentrazioni in gioco per tenere conto del miscelamento dovuto anche ad un gradiente di concentrazione presente nel profilo.



*Figura 5.24: Piani scelti*

Si è fatta un'analisi sui diversi piani per valutare come varia la concentrazione media sui piani al variare della distribuzione di input. I valori percentuali che mostrano la variazione di concentrazione mediata sul piano rispetto al caso con concentrazioni uniformi sono riportati in Tabella 5.7 e 5.8.

### **CH<sub>4</sub> mass fraction= 0.15**

	diminuizione %
Piano 1	8
Piano 2	2
Piano 3	5
Piano 4	1

*Tabella 5.7: Diminuizione percentuale della concentrazione mediata sul piano rispetto alla distribuzione uniforme*

## CH4 mass fraction= 0.3

	diminuizione %
Piano 1	10
Piano 2	11
Piano 3	11
Piano 4	12

*Tabella 5.8: Diminuizione percentuale della concentrazione mediata sul piano rispetto alla distribuzione uniforme*

Sono stati successivamente considerati i casi in cui la faccia è divisa in 64 parti per poter distribuire in maniera dettagliata, e in maniera più simile al caso reale, i pesi associati e dunque le concentrazioni in gioco.

In Figura 5.25 è riportata solo un quarto del profilo totale di input, la distribuzione completa della superficie della source box è invece riportata in Figura 5.26 con evidenziati i diversi pesi associati ad ogni porzione.

0	0	0	0
0	1	1	1
0	1	1,25	1,25
0	1	1,25	1,25

*Figura 5.25: Un quarto del profilo*

0	0	0	0	0	0	0	0
0	1	1	1	1	1	1	0
0	1	1,25	1,25	1,25	1,25	1	0
0	1	1,25	1,25	1,25	1,25	1	0
0	1	1,25	1,25	1,25	1,25	1	0
0	1	1,25	1,25	1,25	1,25	1	0
0	1	1	1	1	1	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 5.26: Distribuzione sul profilo

Le simulazioni sono state dunque re-impostate con questo nuovo approccio per la scelta dei dati di input per la source box. I valori ottenuti, in termini di volumi di sostanza infiammabile che rientrano nel range di infiammabilità del metano sono anch'essi stati comparati con i dati precedentemente descritti e ricapitolati in Tabella 5.9.

CH4 mass fraction integrale	Volume coinvolto entro i limiti di infiammabilità, Concentrazioni uniformi [m3]	Volume coinvolto entro i limiti di infiammabilità Concentrazioni distribuite [m3]	Volume coinvolto entro i limiti di infiammabilità Concentrazioni distribuite 2 [m3]
0.5	1.16	0.93	0.77
0.4	0.888	0.74	0.62
0.3	0.628	0.48	0.34
0.15	0.179	0.16	0.13

Tabella 5.9: Volumi coinvolti al variare della concentrazione di input

Si può notare come considerando come concentrazione integrale i casi elencati in Tabella 5.9, con questa nuova distribuzione si ha una ulteriore riduzione del volume.

I risultati ottenuti sono comparati in Figura 5.27. Si ottengono dunque diminuzioni dell'ordine del 30-50% comparati al volume coinvolto nel caso di distribuzione uniforme.

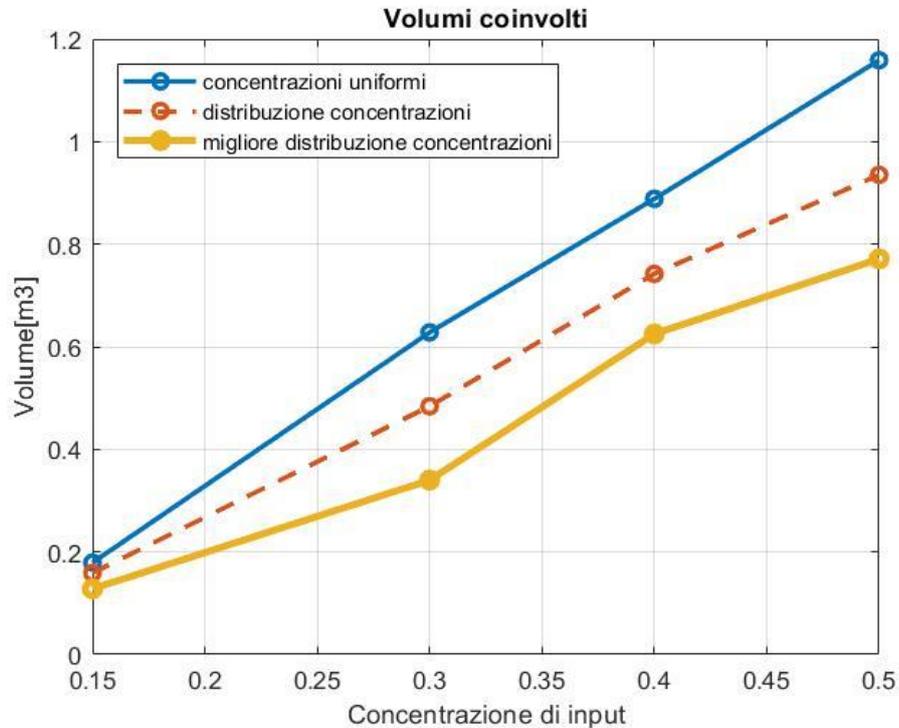


Figura 5.27: Confronto dei volumi coinvolti

Passando dunque da una distribuzione omogenea ad una distribuzione sul profilo più prossima a quella reale, diminuiscono i volumi che rientrano nei limiti di infiammabilità della sostanza. Questo risultato ci permette di capire come sia necessario costruire in maniera accurata una corretta distribuzione sul profilo per sapere correttamente determinare le conseguenze di eventi incidentali.

Si può notare come considerando come concentrazione integrale i casi elencati in Tabella 5.9, con questa nuova distribuzione si ha una ulteriore riduzione del volume.

### 5.2.3 Variazione della velocità di rilascio

Per completare l'analisi di sensitività dei dati di input imposti sul profilo della source box si è presa in considerazione anche la variazione della velocità di uscita del flusso di metano dalla source box. In particolare, sono stati analizzati i casi descritti in Tabella 5.10.

Velocità di uscita del metano dalla source box [m/s]
6
10
15
20

Tabella 5.10: Velocità di uscita del metano dalla source box

Le velocità sono state impostate per ogni simulazione fatta in precedenza, dunque è possibile paragonare come varia il volume coinvolto al variare della velocità di input sia nel caso con concentrazione uniforme, che nel caso di distribuzione delle concentrazioni. In Figura 5.28 è possibile comparare il volume al variare della velocità nel caso di concentrazione uniforme pari a 0.3.

In Figura 5.29 è possibile comparare il volume al variare della velocità nel caso di concentrazione distribuita nel profilo ma con integrale pari a quella rappresentata in figura 5.28.

Si può notare come il volume e l'area coinvolta diminuisce al diminuire della velocità. Questo è dovuto ad un migliore miscelamento con l'aria a velocità più basse che promuove la dispersione e dunque fa sì che la distanza a cui si ottengono valori di concentrazione che rientrano nel limite di infiammabilità diminuisca.

I valori quantitativi ottenuti sono riportati in Figura 5.30, dove si nota che all'aumentare della velocità del metano che viene rilasciato aumenta il volume che rientra nei limiti, ma questo aumento risulta essere inferiore nel caso di simulazioni con distribuzione di concentrazione di metano presente sul profilo.

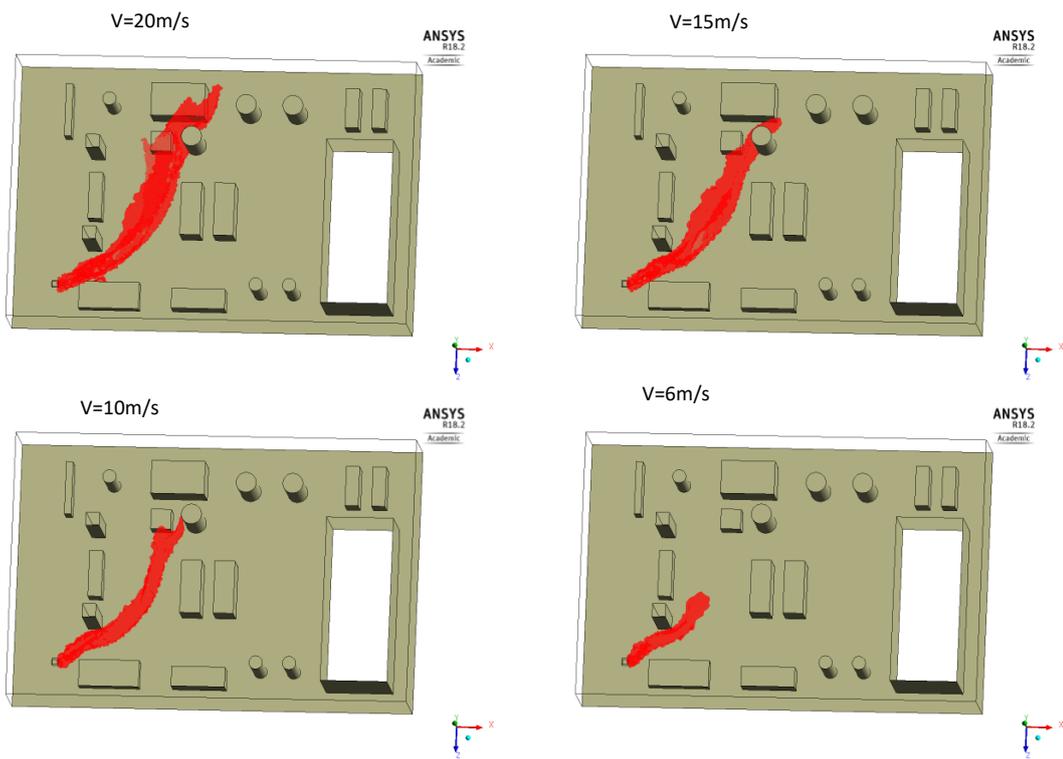


Figura 5.28: Variazione del volume al variare della velocità di uscita del metano. Caso con concentrazioni uniformi

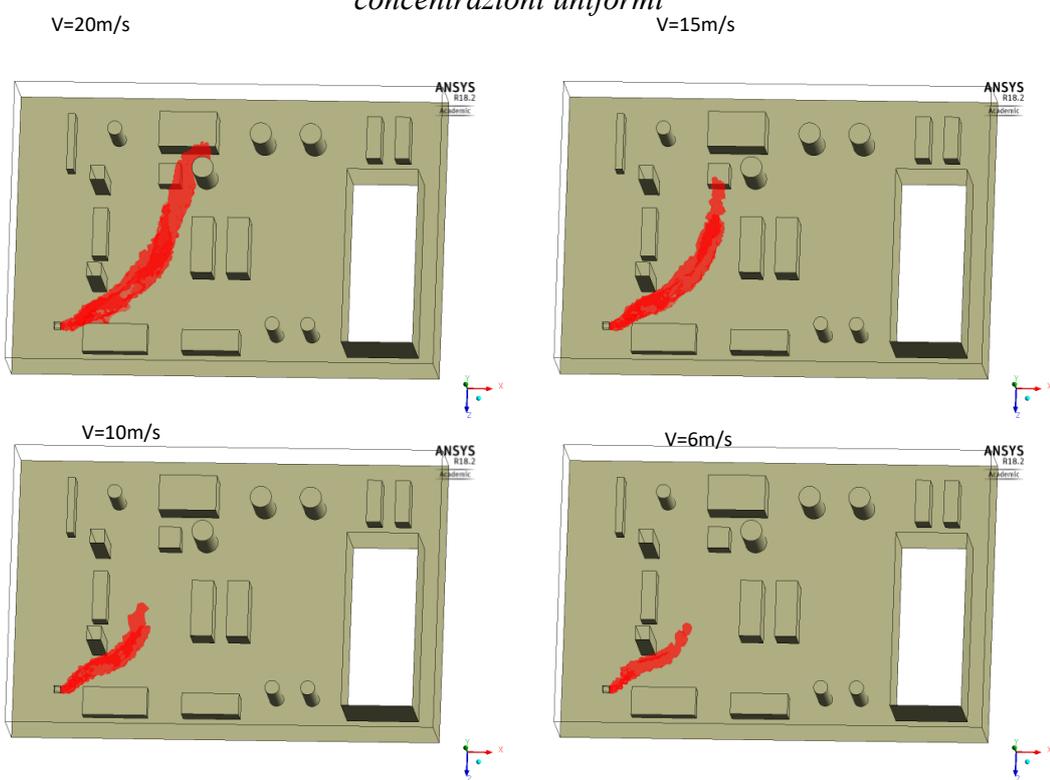


Figura 5.29: Variazione del volume al variare della velocità di uscita del metano. Caso con distribuzione delle concentrazioni

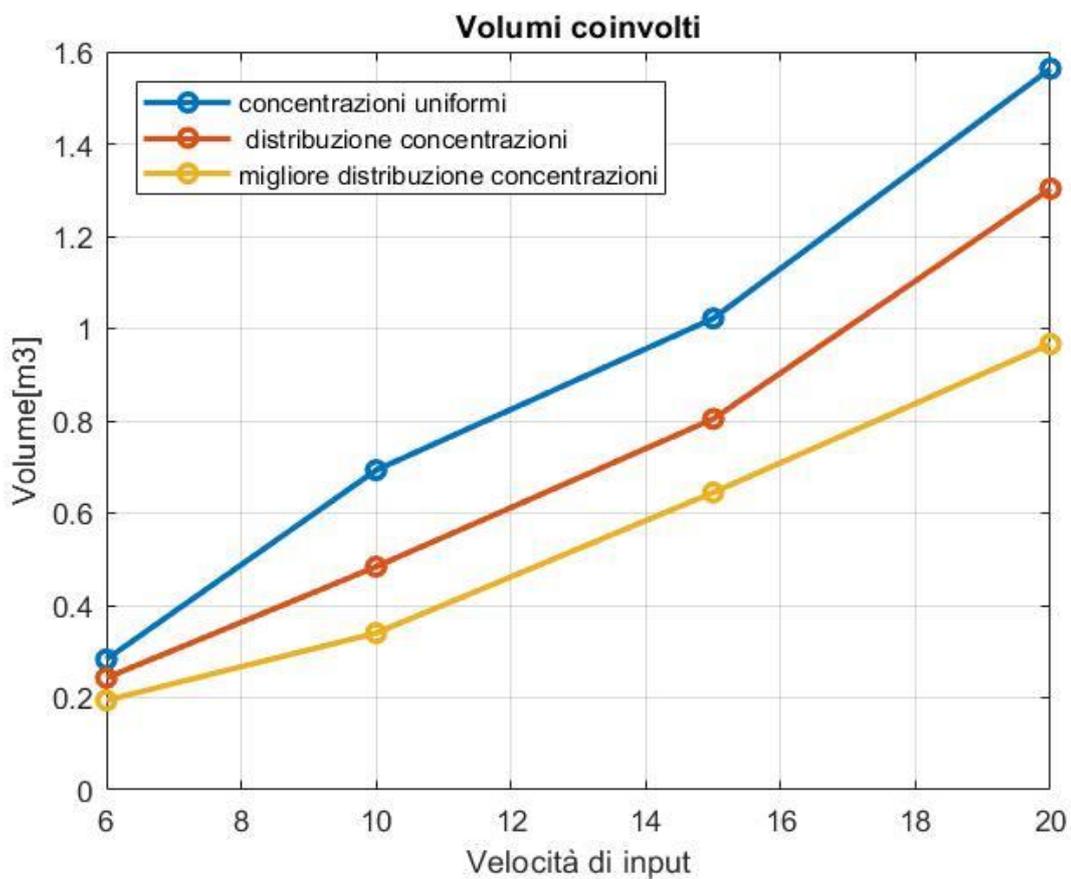


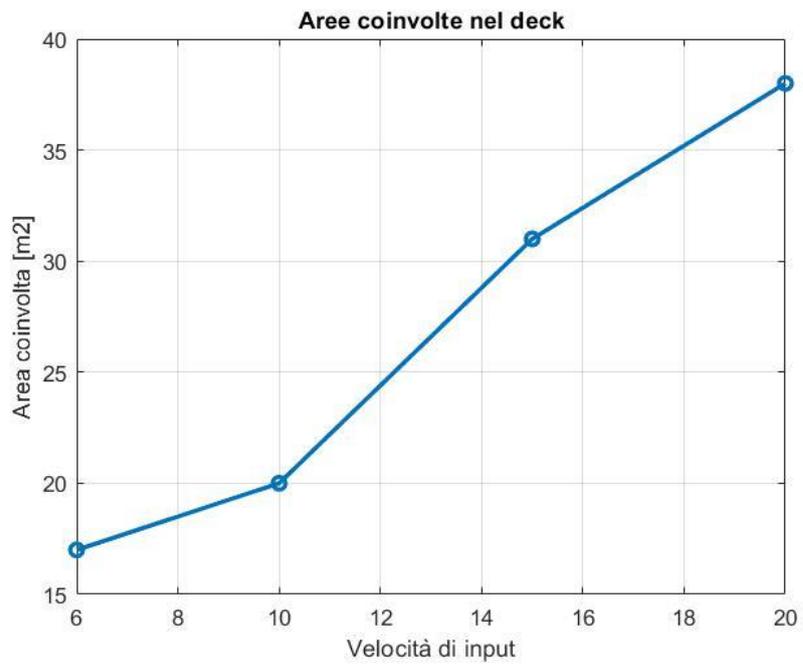
Figura 5.30: Comparazione dei volumi coinvolti al variare della velocità di rilascio

Guardando il grafico ottenuto si nota come passando, per esempio, da una velocità di 10m/s ad una velocità di 15m/s, il volume aumenta da 0.7m<sup>3</sup> a 1.1m<sup>3</sup>, dunque aumentando di soli 5m/s la velocità, il volume aumenta di un fattore 1.5.

Confrontando le aree della piattaforma coinvolte dal volume di sostanza infiammabile, mostrate in Tabella 5.11, si nota come all'aumentare della velocità del rilascio aumentano le aree coinvolte all'interno del deck. È dunque conservativo considerare elevate velocità di rilascio per poter analizzare eventuali altri componenti coinvolti.

Concentrazione	Velocità [m/s]	Area [m2]
0.3	6	17
	10	20
	15	31
	20	38

Tabella 5.11: Aree coinvolte al variare della velocità del rilascio



*Figura 5.31: Area coinvolta al variare della velocità di input*

Nel grafico è mostrato l'andamento monotono crescente dell'area coinvolta all'aumentare della velocità di rilascio del gas metano.

### 5.3 Discussione dei risultati

L'analisi di sensitività svolta sui dati di input necessari per le impostazioni delle simulazioni di dispersione è stata condotta considerando tre steps fondamentali:

- La variazione delle concentrazioni di input intese come medie sul profilo
- La variazione delle concentrazioni in termini di distribuzioni sul profilo mantenendo l'integrale costante
- La variazione delle velocità di uscita del metano dal profilo della source box

I risultati interessanti ottenuti nei tre steps fondamentali sono racchiusi nelle figure 5.32 e figura 5.33.

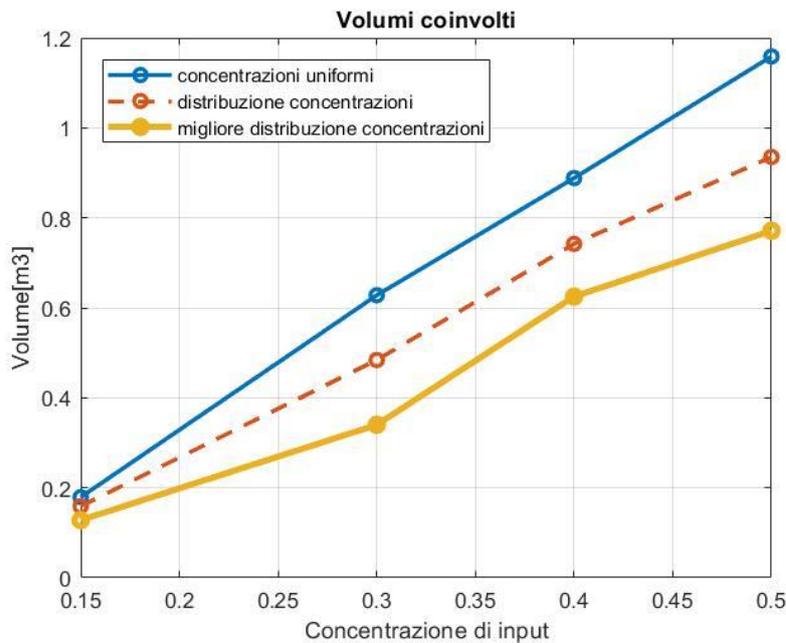


Figura 5.32: Volumi coinvolti al variare della concentrazione di input

Tramite le simulazioni svolte tramite il software Ansys Fluent si è verificato che, un aumento di concentrazione sul profilo della source box, aumenta la quantità di sostanza infiammabile che si viene a creare all'interno del deck di produzione della piattaforma considerato come volume di controllo del presente lavoro.

Il variare della distribuzione del profilo ha ricondotto a interessanti percentuali di diminuzione di tali quantità di interesse, dunque è risultata necessaria un'analisi più dettagliata per identificare correttamente le quantità in gioco essendo questo un parametro fondamentale per le conseguenze che ne possono derivare.

L'analisi è stata impostata considerando una distribuzione del profilo che si avvicini alla reale distribuzione di concentrazione ottenuta in [9]. Si sono raggiunte percentuali di diminuzione delle quantità coinvolte dell'ordine del 30-50%, passando da concentrazioni uniformi a concentrazioni distribuite più simili a quelle reali dunque si sono ottenuti valori interessanti e significativi per la valutazione delle conseguenze. Questo sottolinea dunque l'importanza della creazione di una libreria di source box a cui fare riferimento per poter modellare le simulazioni di dispersioni.

L'area della piattaforma coinvolta dalla nube che rientra nei limiti di infiammabilità ha delle diminuzioni percentuali rispetto all'area coinvolta dalla nube nel caso uniforme elencate in Tabella 5.12.

Concentrazione sul profilo	Area coinvolta [m2]		diminuzione % dell'area coinvolta
	uniforme	distribuita	
0.5	36	30	16%
0.3	28	20	27%
0.15	13	9	32%

*Tabella 5.12: Diminuzioni percentuali dell'area coinvolta*

La diminuzione percentuale dell'area coinvolta, Tabella 5.12, risulta diminuire all'aumentare della concentrazione sul profilo.

L'ultima analisi è stata condotta sulle quantità relative alla velocità di uscita del metano dalla source box. Anche in questo caso la velocità risulta essere un parametro fondamentale perché influenza la quantità di sostanza infiammabile ancora presente sulla piattaforma. Le basse velocità di rilascio tendono ad avere minori zone coinvolte e minori volumi. Dunque, l'analisi su elevate velocità di rilascio è interessante perché aumenta la probabilità di coinvolgere zone della piattaforma dove vi sono presenti numerosi ostacoli con all'interno ulteriori sostanze pericolose.

Le scelte considerate, quali il monitorare i parametri di concentrazione e velocità sul profilo della source box, sono risultate dunque importanti per l'influenza che hanno nella valutazione delle conseguenze dove i parametri fondamentali sono quelle quantità che rientrano nel range di infiammabilità.

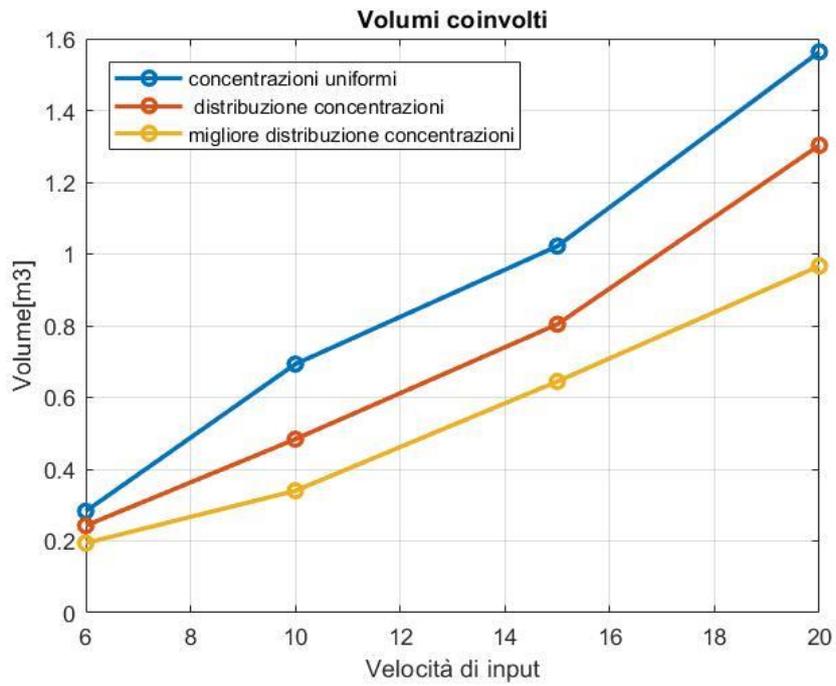


Figura 5.33: Volume coinvolto al variare delle velocità di input

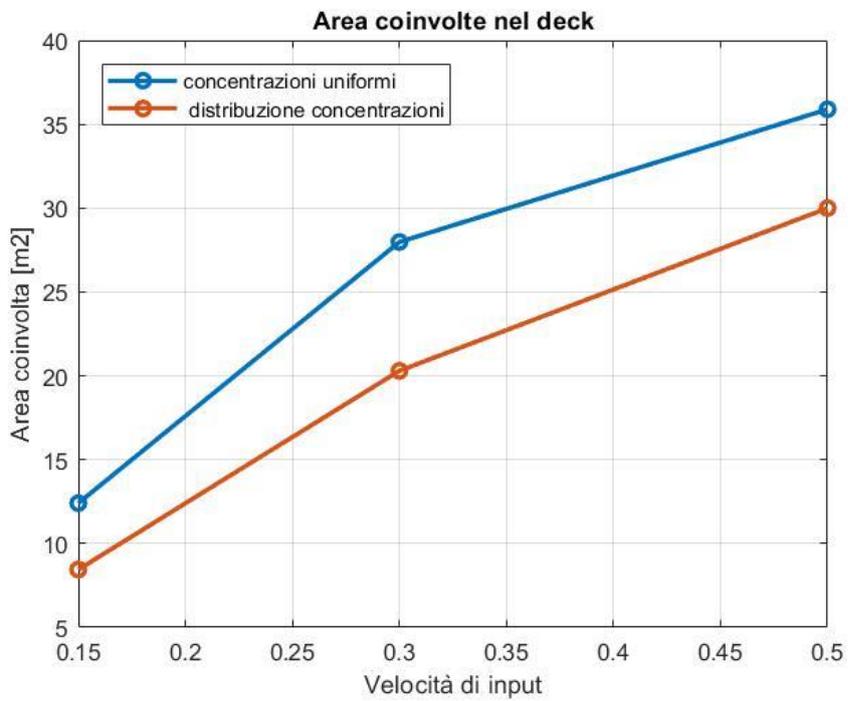


Figura 5.34: Area coinvolta al variare della velocità di input

## 6. Conclusioni e sviluppi futuri

Nel lavoro di tesi proposto ci si è occupati di analizzare i parametri di input necessari per una simulazione di dispersione di sostanza infiammabile all'interno di una piattaforma Oil&Gas offshore, in particolare nel deck di produzione.

Nel contesto della sicurezza e analisi del rischio delle piattaforme petrolifere offshore, il modello adottato per l'analisi delle conseguenze è un modello innovativo, denominato modello Source Box, che ha permesso dunque di simulare la fase di dispersione separata da quella di rilascio.

Il primo passo per la modellazione delle simulazioni è stata la scelta della geometria da adottare. Si è scelta una geometria semplificata prendendo in considerazione solo un piano della piattaforma, il deck di produzione con l'ipotesi di pavimentazione solida, plated, maggiormente presente in Italia. Questo aspetto è risultato molto importante perché influenza le caratteristiche del fenomeno di dispersione.

Tutti i sistemi di trattamento e separazione di olio, gas e acqua, e i sistemi e le valvole di controllo e sicurezza presenti nel deck sono stati rappresentati in maniera semplificativa ma abbastanza rappresentativa dei volumi che occupano all'interno del deck in modo da simulare lo spazio congestionato tipico di una piattaforma Oil&Gas.

Per lo studio della dispersione di un gas, nel nostro caso il metano, in un ambiente geometricamente complesso e con la presenza di numerosi ostacoli, è stato opportuno affidarsi ai codici di fluidodinamica computazionale. In particolare, tramite un'analisi in letteratura, è stato scelto di utilizzare il software Ansys Fluent.

L'imposizione delle condizioni al contorno, necessaria per determinare una delle infinite soluzioni possibili del sistema numerico adottato, è stata realizzata tramite un'analisi delle condizioni meteorologiche italiane nei siti con maggiore presenza di installazioni offshore. Si è localizzata la piattaforma nel Mar Adriatico con il lato minore esposto a nord.

La scelta della mesh, fondamentale per avere una soluzione più accurata contenendo gli errori di approssimazione e mantenendo dei tempi di calcolo accettabili, è stata effettuata tramite un'analisi di grid independence con la scelta di una griglia con un errore dell'1% comparata alla mesh più fitta.

La sostanza scelta per effettuare le simulazioni di rilascio e dispersione è il gas metano, sostanza liquida facilmente infiammabile ad alta pressione, di cui in particolare si è considerato il range di infiammabilità, da cui dipende l'innescò del gas con possibile generazione di incendi ed esplosioni che bisogna saper prevenire e nei casi peggiori mitigare.

Sono state modellate e comparate differenti simulazioni in cui si sono adottate le stesse caratteristiche fisiche e geometriche ma che si differenziano per le quantità fisiche definite sulle superfici della source box in termini di concentrazione e velocità.

L'obiettivo raggiunto è la valutazione di come variano i risultati ricavati nelle simulazioni di dispersione a partire dai dati di input impostati come condizioni iniziali.

Comparando i casi svolti si è ottenuto che, imponendo una distribuzione delle concentrazioni sul profilo della source box più vicina alla distribuzione reale, i parametri che ne influenzano l'analisi delle conseguenze variano significativamente rispetto al caso con distribuzione uniforme sul profilo. Al variare dei parametri considerati, velocità e concentrazione sul profilo, i volumi della nube di gas e le aree coinvolte dalla presenza dello stesso all'interno della piattaforma diminuiscono con proporzioni che raggiungono valori del 30-50%. Questi risultati hanno dunque confermato le aspettative. Infatti, i parametri scelti, quali la velocità e la concentrazione di metano, sono quelli di maggiore interesse perchè influenzano la diffusione in atmosfera ed il miscelamento con l'aria.

Un risultato importante a cui si è giunti è dunque che è necessario simulare la prima fase di rilascio (dominio della source box) separatamente per ottenere buoni risultati in termini di valutazione dei fenomeni di dispersione. È dunque fondamentale creare una libreria di source box a cui fare riferimento a seconda delle condizioni di rilascio che si verificano all'interno della piattaforma, in modo tale da avere già i dati necessari in termini di concentrazione e velocità che sono indispensabili per la simulazione della fase di dispersione.

I risultati ottenuti sono dunque incoraggianti per la scelta del modello Source Box. Con tale modello infatti si è inoltre verificato che, analizzando le due fasi tramite simulazioni separate, si riducono i tempi computazionali richiesti rispetto al modello unico CFD.

Tale modello innovativo permette di avere dei risultati dettagliati e corretti sulla valutazione delle conseguenze. Risulta dunque un modello vantaggioso da utilizzare soprattutto per la riduzione dei tempi in fase di progettazione della piattaforma quando è necessaria un'analisi preliminare per la scelta delle misure di mitigazione al fine di migliorare il livello di protezione e controllo dei processi ed ottenere un livello di rischio accettabile.

Il lavoro svolto è dunque un lavoro preliminare, che aiuta a mettere a punto l'approccio innovativo della source box, ma sono ancora tanti gli aspetti da investigare ed approfondire e le analisi da compiere al fine di comprendere tutti i possibili scenari riscontrabili.

Inoltre, come ulteriori sviluppi futuri può risultare interessante analizzare e confrontare i risultati ottenuti, sempre in termini di aree e volumi di gas all'interno della piattaforma, importando i risultati della prima simulazione (fase di rilascio) come input per la fase di dispersione dunque accoppiando le due simulazioni.

Nel presente lavoro si è svolta inoltre una simulazione su un solo piano con l'ipotesi di piattaforma che produce gas dunque la scelta è ricaduta sul deck plated. Un'altra analisi molto interessante è quella di simulare il dominio di una intera piattaforma considerando tutti i piani per valutare se alcune delle considerazioni fatte siano ancora valide.

## Indice delle figure e delle tabelle

Figura 1.1: Disastro del Golfo del Messico: Deepwater Horizon .....	9
Figura 1.2: Classificazione del rischio .....	16
Figura 1.3: Diagramma per la valutazione del rischio .....	17
Figura 1.4: Criterio di accettabilità del rischio .....	21
Figura 1.5: Schema della regione ALARP .....	22
Figura 1.6: Approcci per la valutazione del rischio .....	23
Figura 1.7: Schema dei possibili scenari .....	24
Figura 1.8: Annalisa; Esempio di piattaforma fissa a quattro gambe .....	27
Figura 1.9: Rappresentazione schematica di una testa di pozzo .....	28
Figura 1.10: Barbara B; struttura tipica di una piattaforma fissa .....	29
Figura 1.11: Esempio di deck plated .....	30
Figura 1.12: proprietà fisiche e chimiche del petrolio .....	32
Figura 1.13: proprietà fisiche e chimiche del gas naturale .....	33
Figura 1.14: Carta Alto Adriatico .....	34
Figura 1.15: Carta Basso Adriatico, Ionio e Canale di Sicilia .....	35
Figura 1.16: Localizzazione Piattaforma .....	36
Figura 1.17: Orientamento Piattaforma .....	36
Figura 1.18: Fasi delle simulazioni .....	38
Figura 1.19: Griglie computazionali [21] .....	39
Figura 1.20: Esempio di griglia strutturata .....	40
Figura 1.21: Esempio di griglia strutturata multiblocco .....	40
Figura 1.22: Esempio di griglia non strutturata .....	41
Figura 1.23: Esempio di griglia ibrida .....	41
Figura 2.1: Struttura di un getto .....	46
Figura 2.2: Possibili approcci .....	47
Figura 3.1: Approccio a due step .....	51
Figura 3.2: Rappresentazione della source box .....	55
Figura 3.3: Collocazione della source box nella piattaforma .....	56
Figura 3.4: Geometria utilizzata per la fase di rilascio [8] .....	57
Figura 3.5: Pipelines in parallelo .....	58
Figura 3.6: Particolare dei limiti di infiammabilità sulle superfici [18] .....	59
Figura 3.7: Particolare dei limiti di infiammabilità sulle superfici [17] .....	59
Figura 3.8: Rilascio contro la parete piana [17] .....	60
Figura 3.9: Distribuzione concentrazioni [8] .....	61
Figura 4.1: Schermata iniziale del software Fluent .....	62
Figura 4.2: Setup di fluent .....	63
Figura 4.3: Miscela di gas metano e aria: sostanza presenti nelle simulazioni .....	64
Figura 4.4: Modello adottato .....	64
Figura 4.5: Models; si è scelto k-w SST .....	64
Figura 4.6: Plated deck: geometria scelta .....	65
Figura 4.7: Piano di produzione con sistemi presenti .....	66
Figura 4.8: Deck di produzione .....	67
Figura 4.9: Deck di produzione, visione dall'alto .....	68
Figura 4.10: Dominio di calcolo, vista dal basso .....	70
Figura 4.11: Costruzione dominio in Fluent .....	70
Figura 4.12: Oggetti settati come wall .....	72
Figura 4.13: source box settata come zona fluida .....	72
Figura 4.14: Velocità del vento sulle coste italiane .....	73

Figura 4.15: Distribuzione della direzione del vento, Ravenna.....	73
Figura 4.16: Distribuzione della direzione del vento, Ancona Boa .....	74
Figura 4.17: Localizzazione piattaforma .....	74
Figura 4.18: Velocity Inlet.....	75
Figura 4.19: Pressure Outlet .....	75
Figura 4.20: Modello delle simulazioni.....	76
Figura 4.21: Dettagli della mesh.....	77
Figura 4.22: Adaptive Mesh, vista dal basso .....	77
Figura 4.23: Opzioni Mesh.....	78
Figura 4.24: Named Selection.....	78
Figura 4.25: Inflation Function .....	79
Figura 4.26: Inflation applicato agli elementi interessati, vista dal basso .....	79
Figura 4.27: Face Sizing .....	80
Figura 4.28: Face sizing applicato agli elementi interessati, vista dal basso.....	80
Figura 4.28: Valore di skewness ottenuto .....	81
Figura 4.29: Valore di Orthogonal quality ottenuto.....	82
Figura 4.30: Simulazioni con griglie differenti .....	83
Figura 4.31: Localizzazione dei punti scelti nella piattaforma.....	84
Figura 4.32: Grid Independence A .....	85
Figura 4.33: Grid Independence B .....	85
Figura 4.34: Grid Independence C.....	86
Figura 4.35: Grid Independence D .....	86
Figura 4.36: Grid Independence E.....	87
Figura 4.37: Grid Independence F.....	87
Figura 4.38: Grid Independence G .....	88
Figura 4.39: Localizzazione dei piani scelti nella piattaforma .....	89
Figura 4.40: Grid Independence Piano 1.....	90
Figura 4.41: Grid Independence Piano 2.....	91
Figura 4.42: Grid Independence Piano 3.....	91
Figura 4.43: Grid Independence Piano 4.....	92
Figura 4.44: Grid Independence Piano 5.....	92
Figura 4.45: Linea per il confronto della mesh .....	93
Figura 4.46: Confronto della velocità lungo la linea tra la mesh migliore e la mesh scelta .....	94
Figura 4.47: Confronto della velocità lungo la linea tra la mesh migliore e la mesh scelta .....	94
Figura 5.1: Particolare della superficie della source box .....	96
Figura 5.2: Valori della velocità su un piano di 1.23m.....	97
Figura 5.3: Valori della velocità su un piano di 3.5m.....	98
Figura 5.4: Visualizzazione delle concentrazioni di metano su un piano di 1.23m .....	98
Figura 5.5: Rilascio di metano .....	99
Figura 5.6: Rilascio di metano: concentrazioni entro i limiti di infiammabilità .....	99
Figura 5.7: Primo set di simulazioni.....	100
Figura 5.8: Confronto di dispersione di metano all'interno del deck al variare della concentrazione di input....	101
Figura 5.9: Confronto di dispersione di metano all'interno del deck al variare della concentrazione di input: legende differenti .....	102
Figura 5.10: Linee scelte .....	102
Figura 5.11: andamenti della concentrazione lungo le Linee 1 e 2 al variare della concentrazione media di input .....	103
Figura 5.12: Andamenti della concentrazione lungo la Linea 3 al variare della concentrazione media di input	103
Figura 5.13: Volume di metano rilasciato.....	104
Figura 5.14: Volume al variare delle concentrazioni di input .....	105
Figura 5.15: Volumi nel range di infiammabilità .....	106

<i>Figura 5.16: Volume al variare delle concentrazioni di input</i> .....	107
<i>Figura 5.17: Concentrazioni sulle superfici della source box [8]</i> .....	108
<i>Figura 5.18: Distribuzione della concentrazione sulle superfici della source box tramite pesi</i> .....	108
<i>Figura 5.19: Simulazioni con profili differenti</i> .....	109
<i>Figura 5.18: Linee per comparare i casi simulati</i> .....	110
<i>Figura 5.19</i> .....	
<i>Figura 5.20</i> .....	111
<i>Confronto dell'andamento della concentrazione rispettivamente sulla linea 1 e sulla linea 2 al variare della distribuzione sul profilo</i> .....	111
<i>Figura 5.21: Confronto dell'andamento della concentrazione sulla linea 3 al variare della distribuzione sul profilo</i> .....	111
<i>Figura 5.22: Simulazione 1</i> .....	112
<i>Figura 5.23: Confronto dei volumi coinvolti</i> .....	112
<i>Figura 5.24: Piani scelti</i> .....	114
<i>Figura 5.25: Un quarto del profilo</i> .....	115
<i>Figura 5.26: Distribuzione sul profilo</i> .....	116
<i>Figura 5.27: Confronto dei volumi coinvolti</i> .....	117
<i>Figura 5.28: Variazione del volume al variare della velocità di uscita del metano. Caso con concentrazioni uniformi</i> .....	119
<i>Figura 5.30: Comparazione dei volumi coinvolti al variare della velocità di rilascio</i> .....	120
<i>Figura 5.31: Area coinvolta al variare della velocità di input</i> .....	121
<i>Figura 5.32: Volumi coinvolti al variare della concentrazione di input</i> .....	122
<i>Figura 5.33: Volume coinvolto al variare delle velocità di input</i> .....	124
<i>Figura 5.34: Area coinvolta al variare della velocità di input</i> .....	124
<i>Tabella 1.1: Incidenti significativi in piattaforme Oil&amp;Gas [5]</i> .....	11
<i>Tabella 1.2: Indici di frequenza</i> .....	18
<i>Tabella 1.3: Indici per la sicurezza delle persone</i> .....	18
<i>Tabella 1.4: Indici per la sicurezza ambientale</i> .....	19
<i>Tabella 1.5: Indici per la produzione</i> .....	19
<i>Tabella 1.6: Matrice di rischio per la produzione</i> .....	19
<i>Tabella 1.7: Matrice di rischio per le persone e l'ambiente</i> .....	20
<i>Tabella 1.8: Legenda delle matrici di rischio</i> .....	20
<i>Tabella 3.1: Dimensioni della source box considerate</i> .....	54
<i>Tabella 3.2: Frequenze di rottura [35]</i> .....	56
<i>Tabella 3.3: caratteristiche della source box</i> .....	57
<i>Tabella 4.1: Dimensioni caratteristiche della geometria scelta</i> .....	66
<i>Tabella 4.2: Componenti presenti nel deck di produzione</i> .....	68
<i>Tabella 4.3: Condizioni al contorno utilizzate nella modellazione</i> .....	71
<i>Tabella 4.4: Valori di skewness e corrispondente qualità della cella</i> .....	81
<i>Tabella 4.5: Valori di Orthogonal quality e corrispondente qualità della cella</i> .....	82
<i>Tabella 4.6: Caratteristiche delle Mesh adottate</i> .....	83
<i>Tabella 4.7: Mesh scelta per le successive simulazioni</i> .....	93
<i>Tabella 5.1: Limiti di infiammabilità del metano</i> .....	95
<i>Tabella 5.2: Concentrazioni imposte sul profilo</i> .....	100
<i>Tabella 5.3: Volumi coinvolti</i> .....	105
<i>Tabella 5.4: Aree coinvolte al variare della concentrazione di input</i> .....	107
<i>Tabella 5.5: Volumi coinvolti al variare della concentrazione di input nel caso di concentrazione uniforme e concentrazione distribuita</i> .....	113
<i>Tabella 5.6: Diminuzione percentuale del volume coinvolto</i> .....	113

<i>Tabella 5.7: Diminuzione percentuale della concentrazione mediata sul piano rispetto alla distribuzione uniforme</i>	<i>114</i>
<i>Tabella 5.8: Diminuzione percentuale della concentrazione mediata sul piano rispetto alla distribuzione uniforme</i>	<i>115</i>
<i>Tabella 5.9: Volumi coinvolti al variare della concentrazione di input</i>	<i>116</i>
<i>Tabella 5.10: Velocità di uscita del metano dalla source box</i>	<i>118</i>
<i>Tabella 5.11: Aree coinvolte al variare della velocità del rilascio</i>	<i>120</i>
<i>Tabella 5.12: Diminuzioni percentuali dell'area coinvolta</i>	<i>123</i>

## **Ringraziamenti**

Un grazie speciale va ai miei genitori che hanno incoraggiato i miei sogni e in tutto questo percorso non mi hanno mai fatto mancare il loro sostegno morale ed economico con tanti sacrifici, se sono arrivata fin qui lo devo a loro.

Ringrazio Andrea per tutto il supporto, l'amore e l'incoraggiamento, soprattutto nei momenti meno facili, lui è stato sempre presente, adesso, ma anche a 1000km di distanza ed ha sempre creduto in me.

Ringrazio Annalisa, migliore Amica e forte sostenitrice pur se dall'altra parte del mondo.

Ringrazio tutti i ragazzi del Seadog per avere alleggerito le lunghe giornate di lavoro rendendole piacevoli.

Ringrazio Carlo con cui ho condiviso le mie gioie e soprattutto le ansie legate alla stesura di questa tesi, confrontandoci e supportandoci a vicenda.

Ringrazio la professoressa Gerboni e la dottoressa Ugenti per i consigli utili, le competenze e per il prezioso contributo che hanno fornito alla stesura di questo lavoro e soprattutto per il loro lato umano.

Ringrazio i professori Carpignano e Ganci per i consigli utili e per i numerosi insegnamenti impartiti durante le lezioni e per la disponibilità e la grande professionalità che mi ha trasmesso curiosità in tali ambiti.

Ringrazio il professore d'Ambrosio per la disponibilità e le competenze tecniche che mi ha trasmesso.

## Bibliografia

- [1] Exxon Mobil Corporation, «The outlook for Energy,» United States of America, Edizione 2017.
- [2] Consiglio dell'unione Europea, Parlamento europeo, «"DIRETTIVA 2013/30/UE DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO",» 2013.
- [3] Ministero dello sviluppo economico - DSG- UNMIG, «Direttiva 2013/30/UE».
- [4] Parlamento Europeo, «"DECRETO LEGISLATIVO 18 agosto 2015 , n. 145"».
- [5] A. Carpignano, "Risk Analysis Booklet".
- [6] Politecnico di Torino, «"Documento di accordo con il Ministero dello Sviluppo Economico"».
- [7] N. Bono, «"Progettazione preliminare di un laboratorio sperimentale per la simulazione di rilasci accidentali di gas in impianti Oil&gas offshore"».
- [8] A. Tortora, «Progettazione di un laboratorio sperimentale per lo studio della dispersione di inquinanti in piattaforme Oil&Gas supportata da modellazione CFD,» 2018.
- [9] C. Rupolo, «"Modellizzazione CFD del rilascio di gas compressi in ambiente off-shore: source boxes",» 2018.
- [10] F. Castiglia, Introduzione all'analisi di rischio.
- [11] Seadog Denerg Politecnico di Torino, «"Analisi di rischio",» 2016.
- [12] J. Casal, "Evaluation of the Effects and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants", Volume 8.
- [13] G. Sobrero, «"Dispense corso LIASE",» Politecnico di Torino.
- [14] Ministero dello Sviluppo Economico- DSG-UNMIG, «"Piattaforme marine e strutture assimilabili",» 2018.

- [15] P. M. e. E. M. G. Giacchetta, « «La sicurezza delle operazioni in mare nel settore idrocarburi e la nuova direttiva europea 2013/30 UE»».
- [16] S. Chandrasekaran, *Dynamic Analysis and Design of Offshore Structures*.
- [17] H. L. Gengshen Liu, «Offshore Platform Integration and Floatover Technology».
- [18] S. Guasco, ««Towards the CFD simulation of accidents on off-shore platforms: dispersion of a turbulent jet hitting a flat plate»».
- [19] E. Pederiva, ««Towards the CFD simulation of accidents on off-shore platforms: dispersion of a turbulent jet hitting a cylinder»».
- [20] PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO, «REGOLAMENTO (CE) N. 1272/2008 DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO,» 2008.
- [21] W. Henk Kaarle Versteeg, "An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method".
- [22] A. Bakker, «"Applied Computational Fluid dynamics, Meshing"».
- [23] J. & P. Ferziger, "Computational methods for fluid dynamics", USA, Springer: 3rd edition, Stanford, 2003.
- [24] T. Ghisu, «"Introduction to Meshing"».
- [25] «www.ansys.com,» ANSYS Inc., 2018. [Online].
- [26] W. David C, "Turbulence Modeling for CFD", Third edition 2006.
- [27] C. J. Çengel Y., *Fluid Mechanics*, 1 ed., McGraw-Hill, 2006, 2006.
- [28] G. & S. R. Coleman, *A Primer on Direct Numerical Simulation of Turbulence – Methods, Procedures and Guidelines*. Technical Report AFM-09/01, University of Southampton, UK..
- [29] M. Impalà, *Models and Tools for the simulation of exhaust dispersion in oil&gas offshore platforms*, 2016.
- [30] B. D. Wilkening H., «“CFD modelling of accidental hydrogen release from pipelines”», in *International Journal of Hydrogen Energy*, July 2007.

- [31] C. J., \*. Hur N., \*. Kang S., L. E.D. e L. K.B., «“A CFD simulation of hydrogen dispersion for the hydrogen leakage from a fuel cell vehicle in an underground parking garage”,» in *International Journal of Hydrogen Energy*.
- [32] B. D. A. P. H. P. W. H. Venetsanos A.G., « “CFD modelling of hydrogen release, dispersion and combustion for automotive scenarios”,» in *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*.
- [33] G. A. L. C. M. G. V. P. Liu X., «“Source strength and dispersion of CO2 releases from high-pressure pipelines: CFD model using real gas equation of state”,» in *Applied Energy*.
- [34] L. K. a. M. D. K. Stephens M. J., «"A model for sizing high consequence areas associated with natural gas pipelines",» in *Stephens M. J., Leewis K. and Moore D. K.. A model for sizing high consequence areas a 4th International Pipeline Conference, 2002 .*
- [35] «OGP».
- [36] ISPRA, «Rete Mareografica Nazionale,» [Online].
- [37] RSE, «atlante Eolico,» Online, [Online]. Available: [http://atlanteolico.rse\\_web.it/..](http://atlanteolico.rse_web.it/)
- [38] ««windfinder»,» [Online]. Available: <https://it.windfinder.com/windstatistics..>
- [39] A. S. R. Spalart P R, A one equation turbulence model for aerodynamic flows, 1992.
- [40] P. F. C. E. Novembre N., «“Numerical study for accidental gas releases from high pressure pipelines”, European Conference on Computational Fluid Dynamics, TU Delft, The Netherlands, 2006».
- [41] M. F, M. L e D. M, «The finite Volume Method in computational Fluid Dynamics».