# POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica e Nucleare

Tesi di Laurea Magistrale

Studio di getti sotto-espansi e applicazione di meta-modelli a supporto della simulazione CFD di rilasci incidentali in ambito Oil & Gas.



**Relatore** Prof. Andrea Carpignano

**Co-relatori** Prof. Nicola Pedroni Prof.ssa Raffaella Gerboni **Candidato** Federica Carbone

Anno Accademico 2019-2020

#### Abstract

Le installazioni Oil & Gas offshore sono soggette al rischio dei *major accidents* per via delle condizioni ostili in cui operano e delle sostanze chimiche infiammabili coinvolte. Molti eventi incidentali hanno quindi il potenziale di arrecare seri danni a persone, ambiente ed asset di produzione. Tra le possibilità per rendere la produzione di idrocarburi in mare aperto sempre più sicura, rientra una più accurata modellazione delle conseguenze durante la redazione dei documenti di valutazione dei rischi. A livello nazionale è forte l'interesse nell'individuare metodologie innovative per la quantificazione verso la decarbonizzazione del mix energetico italiano, è ancora previsto un contributo sostanziale del gas naturale per soddisfare la domanda di energia. In questo contesto si colloca il presente lavoro di tesi che, grazie alle risorse del laboratorio SEADOG (*Safety & Environmental Analysis Division for Oil & Gas*) del Politecnico di Torino, ha potuto occuparsi di rilasci incidentali di gas naturale da una tubazione altamente pressurizzata posta su un deck di produzione di una piattaforma offshore.

In particolare, il lavoro di tesi si prefigge di testare le capacità predittive di un metamodello di ordine ridotto (ROM), per comprendere se possa essere sfruttato a supporto delle dispendiose simulazioni CFD. Questo macro-obbiettivo è stato conseguito portando a compimento alcuni sotto-obbiettivi. Essi risiedono nello studio dei getti sottoespansi e della loro corretta modellazione, nell'individuazione di un metodo adeguato di addestramento del meta-modello e nella scelta di un criterio con cui stabilire se gli errori del ROM siano accettabili o meno.

Il lavoro è stato sviluppato in tre fasi. La prima ha permesso di definire lo spazio dei parametri, ovvero la combinazione delle grandezze da utilizzare per costruire i set di addestramento del meta-modello. La seconda è consistita nella simulazione CFD degli scenari selezionati: il fenomeno di rilascio è modellato sfruttando il modello SBAM (*Source Box Accident Model*) sviluppato dai membri del laboratorio SEADOG, il quale si serve di un innovativo approccio CFD (*Computational Fluid Dynamics*) per suddividere l'evento incidentale in due step: il rilascio e la dispersione. Infine, la terza fase è consistita nella validazione del modello ROM tramite un confronto tra le simulazioni CFD e i risultati prodotti dal modello per combinazioni di parametri non appartenenti al set di addestramento.

La ricerca sviluppata durante la tesi ha permesso di valutare positivamente l'utilizzo di un meta-modello a supporto delle simulazioni CFD in quanto, oltre all'esiguo onere computazionale, si è dimostrato in grado di riprodurre eventi per cui non è stato addestrato con errori di approssimazione accettabili. Un ulteriore risultato scaturito dalle analisi effettuate, è l'aver acquisito la consapevolezza dei miglioramenti da apportare affinché il meta-modello possa essere impiegato nell'analisi del rischio. Essi consistono principalmente nella rappresentazione di uno spazio dei parametri a più dimensioni e nella ricerca di una metodologia per sopperire alla sottostima della quantità di infiammabile a cui porta il ROM.

#### Abstract

Offshore Oil & Gas installations are subject to the risk of major accidents due to the hostile conditions in which they operate and to the flammable chemical substances handled. Therefore, many accidents have the potential to cause severe damage to people, environment and production asset. Among the possibilities to make offshore hydrocarbon production safer, there is a more accurate modelling of the consequences when drafting risk assessment documents. At national level, there is a strong interest in identifying methodologies for quantifying the risk related to accidents, since, although a transition towards decarbonization of Italian energy mix is underway, a substantial contribution of natural gas is still needed to satisfy energy demand. This thesis work is placed in this context which, thanks to the resources of SEADOG (Safety & Environmental Analysis Division for Oil & Gas) laboratory of Politecnico di Torino, deals with accidental releases of natural gas from a highly pressurized pipeline placed on a production deck of an offshore platform.

In particular, the thesis work aims to test the predictive capabilities of a reduced-order model (ROM), to understand whether it can be exploited to support expensive CFD simulations or not. This macro-objective has been achieved by completing some sub-objectives. They mainly consist in the study of under-expanded jets and their correct CFD modeling, in the identification of an adequate training method for the meta-model and in the choice of a criterion with which establish whether ROM errors are acceptable or not.

The thesis work has been developed in three steps. The first one allowed to define the parameter space, i.e. the combination of the physical and geometrical quantities to be used to build the training sets of the meta-model. The second consisted in the CFD simulation of the selected scenarios. The accidental release is modeled using the SBAM (*Source Box Accident Model*) model developed by the members of SEADOG laboratory, which uses an innovative CFD (*Computational Fluid Dynamics*) approach to split the incidental event into two different phenomena: the release and the dispersion. Eventually, the third phase consisted in the validation of the ROM model, performed by comparing CFD simulations with the results produced by the model for combinations of parameters not belonging to the aforementioned training sets.

The research developed during the thesis made it possible to positively evaluate the use of a meta-model to support CFD simulations. In fact, in addition to the low computational burden, it was shown to be able to reproduce events for which it was not trained to. A further result coming from the analyses carried out, is having acquired the awareness of the improvements to be made so that the meta-model can be used in risk analysis. They mainly consist in the representation of a multi-dimensional parameter space and in the search of a methodology to compensate the underestimation of the quantity of flammable gas dispersed on the production deck of an offshore rig.

## Indice dei contenuti

Introduzione	1
Capitolo 1 Contestualizzazione	3
1.1 Impianti di produzione offshore	
1.2 Il contesto italiano	
1.2.1 Quadro Normativo	9
1.2.2 Attività di ricerca in ambito offshore	
1.3 QRA in ambito offshore	
1.4 Strumenti di modellazione	
1.4.1 Modelli CFD	
1.4.2 Modelli di ordine ridotto ROMs	
1.5 Punti di partenza, obbiettivi e metodologia della tesi	
Capitolo 2 Rilasci gassosi tra fisica e modelli	21
2.1 Fisica del rilascio gassoso	
2.1.1 Fluidi comprimibili	21
2.2 Modelli per i rilasci gassosi	
2.2.1 Dominio fase di rilascio: la Source Box	
2.2.2 Dominio della dispersione: piattaforma petrolifera	
Capitolo 3 Metamodellazione	
3.1 Cenni di metamodellazione	
3.2 Processo di riduzione del modello CFD	
3.2.1 Calcolo delle basi dello spazio dei parametri	40
3.3 Definizione dei set di addestramento e validazione	
Capitolo 4 Simulazioni CFD	48
4.1 Panoramica del problema	
4.2 Pre-processing	
4.2.1 Modellazione geometrica	51
4.2.2 Generazione della griglia di calcolo	
4.2.3 Setup dell'analisi fluidodinamica	
4.3 Post-processing	
4.3.1 Criticità riscontrate e risoluzione	

Capitolo 5 Discussione dei risultati	
5.1 Risultati a confronto	73
5.2 Infittimento dei punti di addestramento e risultati	77
5.3 Influenza dell'errore globale sulla fase di dispersione	
5.4 Libreria di SB o impiego real time?	
Conclusioni e Sviluppi futuri	89
Bibliografia	
APPENDICE A – Norma Infinito	
APPENDICE B – Norma Euclidea parziale	

#### Introduzione

Al giorno d'oggi il settore energetico deve far fronte a una duplice sfida: fornire energia affidabile, sicura e a buon mercato a una popolazione in continua crescita senza trascurare gli impatti ambientali, tra cui il rischio sempre più accelerato del cambiamento climatico. Entro il 2040 infatti, si stima un aumento del 20% della domanda energetica su scala globale [1], soddisfatta diversamente dalle economie dei paesi OECD e non-OECD: se infatti i primi avranno gli strumenti per innovare e adeguare le tecnologie già consolidate ai fini di ridurre le emissioni, i secondi adotteranno fonti convenzionali a sostegno del progresso economico in atto.

Il mix energetico che provvederà a soddisfare questa crescita di domanda, nell'arco temporale 2017-2040, si compone di molteplici e differenziate risorse. Nonostante sia previsto un tasso di crescita elevato per le energie rinnovabili, la richiesta di energia sarà ancora soddisfatta da una quota importante di idrocarburi, in quanto queste fonti offrono affidabilità e convenienza per sostenere il progresso economico mondiale. Negli anni a venire dunque, l'importanza dell'Oil & Gas è destinata a diminuire ma non a scomparire. Infatti, le proiezioni degli Energy Outlook [1] [2], mostrano un aumento della domanda, quindi della produzione, di Gas Naturale (GN). Ad oggi il GN costituisce l'alternativa migliore per mitigare i rischi del cambiamento climatico. Il suo incremento è dovuto alla natura flessibile di questa fonte, che le permette di essere adoperata in vari campi tra cui la generazione elettrica, combustione industriale e usi domestici.

Il permanere delle fonti fossili nel panorama energetico mondiale però, implica una innovazione delle sue tecnologie per poter andare incontro alle necessità di ridurre le emissioni, accompagnata da una più accurata analisi del rischio come strumento per prevenire e mitigare i danni a cui si può incorrere qualora queste attività non venissero operare in totale sicurezza. L'analisi del rischio nel settore Oil & Gas e in particolare nella divisione off-shore, è fondamentale per prevenire e mitigare gli impatti che tali attività potrebbero provocare. L'esigenza di valutare i rischi nasce dal fatto che le sostanze maneggiate sono caratterizzate da elevata infiammabilità e tossicità e in più le condizioni operative sono estremamente pericolose per questi fluidi. In aggiunta gli ambienti in cui vengono eseguite le attività di perforazione e produzione di idrocarburi sono soggetti a sollecitazioni metereologiche e geologiche estremamente difficili da controllare.

Il presente lavoro di tesi si colloca nel contesto dell'analisi del rischio delle attività petrolifere offshore e nello specifico nella fase di valutazione delle conseguenze degli scenari incidentali. Essi, nel caso in analisi, riguardano il rilascio di metano all'interno di una tipica piattaforma italiana di produzione di gas naturale: si assume che il rilascio di gas sia seguito da una fase di dispersione della nube infiammabile. Ogni scenario è contraddistinto da diversi valori di pressione di stoccaggio del gas. L'approccio scelto per la modellazione degli eventi incidentali è del tipo *Two-Steps*, tecnica che permette di simulare separatamente le fasi di rilascio e di dispersione. Questa tecnica si è rivelata essere più efficace dell'approccio *One-Step*, tuttavia è caratterizzata da oneri computazionali ancora troppo elevati per consentire una rapida analisi delle conseguenze. L'obbiettivo principe della tesi quindi, risiede nel testare le capacità predittive di un modello di ordine

ridotto rispetto alla fluidodinamica computazionale (CFD) e di definire i parametri con cui valutare queste capacità. Questo lavoro è prodotto nell'ottica di costruire una tabella contenente varie pressioni di stoccaggio del gas. In questo modo l'analista del rischio, in base ai suoi particolari parametri operativi, non dovrà simulare nuovamente la fase di rilascio, ma potrà servirsi degli output da essa prodotti per modellizzare la sola fase di dispersione. Il lavoro prende parte di un progetto finanziato dal Ministero dello Sviluppo Economico ed è stato svolto in remoto presso il laboratorio SEADOG (*Safety & Environmental Analysis Division for Oil & Gas*) del Politecnico di Torino. La tesi è strutturata secondo i seguenti capitoli:

Il primo capitolo mira a contestualizzare il lavoro di tesi, al fine di comprendere quali siano le tecnologie offshore adottate oggigiorno e le motivazioni per cui l'impiego dell'analisi del rischio in queste attività sia sempre più diffuso.

Il secondo capitolo si occupa di esporre la fisica alla base degli eventi incidentali simulati durante la tesi e di illustrare le varie opzioni per modellare i rilasci gassosi. In particolar modo, ci si concentra sul modello SBAM, il quale permette di simulare separatamente la fase di rilascio e di dispersione.

Il terzo capitolo introduce il lettore all'ambito della meta-modellazione e stabilisce i case study da simulare nel capitolo successivo.

Il quarto capitolo si pone l'obbiettivo di spiegare brevemente come è stata impostata l'analisi fluidodinamica e di analizzare criticamente i risultati ottenuti da essa.

Il quinto capitolo propone un confronto tra i risultati ottenuti dalle simulazioni CFD e dal suo modello surrogato P-NIROM e una discussione su come migliorare le prestazioni di quest'ultimo. Il capitolo si conclude con una panoramica sulle modalità di impiego del meta-modello.

Infine, si traggono le conclusioni a cui si è giunti a valle del presente lavoro di tesi e si propongono sviluppi futuri volti a migliorare e indagare ulteriormente alcuni aspetti emersi durante lo svolgimento della presente trattazione.

# Capitolo 1 Contestualizzazione

Il primo capitolo definisce il contesto, gli obbiettivi e la metodologia adottata per lo sviluppo della presente trattazione. I rischi connessi alle attività di produzione offshore di idrocarburi sono elevati e tramite il paragrafo 1.1 si cerca di inquadrare quali essi siano esplorando le tecnologie più diffuse nel settore Oil & Gas. Dopo aver compreso le problematiche del caso, nel paragrafo 1.2 sono brevemente esposte le principali caratteristiche dell'offshore italiano e il quadro normativo esistente. Procedendo con il paragrafo 1.3 si approfondiscono le procedure di analisi del rischio nel settore dell'Oil & Gas e ci si focalizza sulla valutazione delle conseguenze di un evento incidentale.

## 1.1 Impianti di produzione offshore

Il settore Oil & Gas comprende diverse attività legate all'esplorazione, all'estrazione e alla produzione di petrolio e gas naturale. Inizialmente le suddette operazioni si svolgevano sulla terraferma, ma l'aumento della richiesta di energia a livello mondiale combinato alla preoccupazione dell'esaurimento dei pozzi, ha spinto il settore dell'Oil & Gas a sviluppare tecnologie che rendessero accessibili i giacimenti di idrocarburi al di sotto dei fondali marini.

Le piattaforme di produzione offshore sono classificate in base alla profondità e alle caratteristiche geologiche del fondale di perforazione. Le principali strutture sono elencate di seguito [3]:

- *Fixed platform* (FP);
- *Compliant Tower* (CT);
- *Tension Leg Platform* (TLP);
- SPAR Platform (SP);
- Floating Production System (FPS);
- Subsea System (SS);
- Floating Production, Storage & Offloading System (FPSO).

Per profondità modeste, cioè inferiori ai 300-400 m, le piattaforme installate sono caratterizzate da strutture fisse ancorate al fondale. Esse fungono da strutture di sostegno per i moduli che alloggiano gli impianti di superficie (*topside*), i quali si sviluppano in altezza a una certa distanza dal pelo libero dell'acqua in modo da non essere sottoposti al moto ondoso delle correnti. Le piattaforme fisse sono facilmente interconnesse con i centri

di raccolta e trattamento degli idrocarburi sulla terraferma, quindi generalmente non sono equipaggiate di sistemi di stoccaggio.

Il *topside* è comune alle diverse tipologie di piattaforme e ospita [4] [5] gli impianti di perforazione che possono essere rimossi e riutilizzati per altre unità offshore una volta avvenuto il completamento del pozzo, le teste pozzo (sistema di valvole in grado di convogliare gli idrocarburi provenienti dai tubi guida agli impianti di trattamento della piattaforma), gli impianti di processo, di compressione e pompaggio degli idrocarburi e i sistemi di sicurezza ed emergenza. Generalmente appartengono a questa categoria:

- i generatori d'emergenza e gli UPS. I primi intervengono quando i sistemi di generazione di corrente primaria sono stati interrotti, mentre i gruppi elettrogeni intervengono quando nemmeno i sistemi di emergenza sono in grado di attivarsi;
- impianti antincendio attivi e passivi;
- sistemi di allarme;
- piani definiti di evacuazione del personale;
- sistemi di *shut-down* in grado di bloccare la produzione in caso di emergenza.

In altri moduli del topside sono collocati poi le torce o fiaccole, sistemi atti a bruciare i gas in caso di emergenza o sovraproduzione, gli alloggi e i sistemi di trasferimento del personale e le sale e i sistemi di controllo. Il funzionamento dell'equipaggiamento di una piattaforma è sorvegliato ininterrottamente grazie ai pannelli di controllo situati nelle sale di controllo e interconnessi agli strumenti che rilevano i parametri operativi di tutte le apparecchiature [4].

La totalità degli impianti menzionati è sostenuta da strutture ancorate sul fondale marino. Queste strutture, oltre a sorreggere il topside, assolvono alla funzione di trasferimento dei carichi a cui sono soggette sul fondale marino. Infatti, le strutture sono progettate in modo da scaricare i carichi ambientali (sismi, venti, correnti e onde), i pesi propri e dei moduli sovrastanti sul fondale marino. In aggiunta devono sostenere i tubi guida (*conductor*) e i *riser*, tratti di condotte sottomarine che dal fondale risalgono fino alle apparecchiature di superficie. Principalmente esistono due tipologie di strutture di sostegno per il topside:

- strutture di supporto reticolare (*jacket*);
- strutture di supporto a gravità (Gravity Based).

La più diffusa è il *jacket*, struttura reticolare realizzata in acciaio tramite una rete di elementi tubolari in grado di renderla snella e leggera (ibid.). Essa è progettata per trasferire tutti i carichi menzionati precedentemente a un sistema di pali di fondazione. L'altra struttura, al contrario, è massiccia e pesante ed è progettata per resistere alle sollecitazioni ambientali per sola azione della gravità. Entrambe le strutture di sostegno sono riportate in Figura 1.



Figura 1 - tipologie di supporti del topside: jacket (sinistra) e GB (destra) [4].

Per profondità superiori ai 400 m invece, bisogna adottare delle soluzioni tecnologiche che consentano alle piattaforme di oscillare in risposta alle sollecitazioni delle correnti. Alle difficoltà già sottolineate quindi si aggiungono ulteriori sfide tecnologiche. Infatti, la mancanza di una struttura di sostegno rigida fa sorgere il problema di come far risalire gli idrocarburi fino al topside: in questo caso le tubazioni dovranno adattarsi alla dinamica dei moti sottomarini. In più nei bassi fondali si ha a che fare con pressioni idrostatiche sensibilmente maggiori e temperature minori: le tubazioni dovranno essere munite di un adeguato isolamento termico e dovranno resistere alle alte pressioni. Nel contesto degli alti fondali quindi, che possono raggiungere anche i 2000 metri di profondità, si adottano principalmente due soluzioni: laddove gli studi mostrano evidenza di limitati spostamenti degli impianti topside, le teste pozzo sono installate in superficie e le tecnologie di completamento e intervento sui pozzi sono simili a quelle utilizzate per i fondali bassi. Nei casi in cui invece gli spostamenti sono tali per cui non è possibile operare in sicurezza, gli impianti di trattamento superficiali vengono abbinati a sistemi di produzione con teste di pozzo subacquee e sistemi di completamento dei pozzi non convenzionali (ibid.).

Le piattaforme in alti fondali con le teste pozzo in superficie includono le piattaforme Compliant Tower, Tension Leg Platform e SPAR. La *Compliant Tower* è simile alle piattaforme a struttura fissa, ma a differenza di esse presenta una struttura di sostegno più snella e meno rigida, in grado di conferirle un periodo naturale di oscillazione maggiore di quello delle onde più significative. In questo modo è possibile scongiurare i fenomeni di risonanza che, nelle piattaforme convenzionali sono evitati garantendo periodi di oscillazione naturale inferiori a quelli delle onde (il *jacket* infatti ha rigidezza maggiore). Il supporto è una struttura a traliccio a sezione quadrata che ricorda un *jacket*. Tuttavia, si distingue da quest'ultimo per la bassa rigidezza ottenuta sia tramite una sezione di base molto ridotta in rapporto della profondità a cui si trova, sia tramite uno snodo strutturale che si comporta come una cerniera. Lo snodo può essere costruito alla base o a una certa altezza dalla base. In questo caso il traliccio è composto da una torre inferiore e da una superiore, come in Figura 2. La sezione superiore alle estremità possiede dei perni che vengono inseriti nelle gambe della sezione inferiore: l'intercapedine che si forma è sigillata con un getto di calcestruzzo. Rotazioni eccessive della sezione superiore sono impedite da elementi strutturali che si comportano come molle. Infatti, in corrispondenza della cerniera sono posizionati due tubi per angolo che si sviluppano in altezza. Se la torre oscilla eccessivamente in una direzione, i tubi del lato opposto subiscono forze di trazione e riportano la torre in posizione stabile. Come precedentemente accennato, queste piattaforme presentano un topside simile alle piattaforme fisse. Le CT sono adottate per profondità tra i 500-600 m: per profondità maggiori si prediligono le TLP oppure le SPAR.



Figura 2 – Schema di piattaforme utilizzate negli alti fondali [4].

La *Tension Leg Platform* è caratterizzata dall'alloggiamento degli impianti di superficie su un particolare scafo galleggiante, mantenuto in posizione stabile da un sistema di tiranti verticali fissati al fondale marino. Lo scafo si compone di quattro colonne cilindriche dal

grande diametro ed è in grado di garantire un'ottima stabilità alla piattaforma strutturale. Infatti, quando zavorrato nelle condizioni operative, raggiunge pescaggi molto elevati. In più i tiranti tubolari in acciaio sono ancorati al fondale tramite una solida struttura di pali di fondazione. Questa soluzione trova applicazione in fondali che vanno dai 500 ai 1200 m di profondità. Non consente di stoccare gli idrocarburi, quindi è spesso abbinata a linee di esportazione oppure a navi di stoccaggio FSO (*Floated Storage Offloading*).

Esistono poi le piattaforme **SPAR** (ibid.), il cui scafo è costituito da una torre cilindrica in assetto verticale. La torre è cava al suo interno per consentire il passaggio dei *riser* di produzione dai pozzi alle teste pozzo e quindi agli impianti di trattamento. Gli impianti sul topside sono simili alle piattaforme convenzionali, a meno dei sistemi di perforazione. I pozzi infatti, vengono perforati prima di installare la piattaforma tramite appositi mezzi di perforazione. Dopodiché, il completamento del pozzo avviene dalla sommità della torre. La SPAR è collegata al fondale tramite un sistema di ormeggio composto da cavi radiali avvolti lungo la torre secondo le pulegge di guida e ancorati al fondale tramite dei pali battuti o dei *suction anchors*. Questi ultimi sono strutture cilindriche aperte all'estremità inferiore e chiuse alla sommità per permettere l'ormeggio dei cavi terminali della piattaforma. L'estremità aperta consente al cilindro di sprofondare nel terreno e tramite apposite pompe sottomarine si aspira l'acqua dal cilindro, ottenendo all'interno una pressione minore di quella esterna.

Si è detto poi che nel contesto dei fondali profondi esistono delle unità di produzione galleggianti a cui sono abbinati sistemi di produzione sottomarini. Le unità di produzione sono costituite da mezzi navali. Le **FPS** (*Floating Production System*) sono delle navi di perforazione tenute in posizione da un sistema di ancoraggio realizzato con delle catene. Le **FPSO** (*Floating Production Storage and Offloading*) a differenza delle precedenti sono in grado di stoccare gli idrocarburi e di trasportarli esse stesse sulla terraferma. Queste unità sono adoperate laddove i giacimenti sono copiosi e ad alte profondità (ibid.).

#### 1.2 Il contesto italiano

La crescita demografica, l'accelerare delle tecnologie e la digitalizzazione porteranno ad un impatto sempre crescente delle attività antropiche sull'ambiente e dello sfruttamento delle sue risorse. Queste dinamiche richiedono una transizione verso nuovi modelli di produzione dell'energia, volti a diminuire le emissioni climalteranti. Attualmente in Italia sono stati avviati i lavori per predisporre il Piano per la Transizione Energetica Sostenibile delle Aree Idonee (PiTESAI). Esso è preposto a valorizzare la sostenibilità ambientale e socio-economica e ad incentivare il processo di decarbonizzazione. L'adozione del Piano, inoltre, individua le aree idonee per lo svolgimento delle attività Oil & Gas da parte degli operatori [6]. Quindi finché tale piano non sarà attuato, lo Stato sospende il conferimento di nuovi permessi di prospezione e di ricerca degli idrocarburi e blocca i permessi già in essere, sia in ambito onshore che offshore (ibid.). Tuttavia, la predisposizione del PiTESAI non interessa le concessioni di coltivazione già assegnate.

Allo stato dell'arte la produzione nazionale di gas naturale (Sm<sup>3</sup>), olio greggio e gasolina (kg) è reperibile sul sito del Ministero dello Sviluppo Economico (MiSE) ed è aggiornato con cadenza annuale [7]. Nel 2020, il settore offshore ha prodotto:

Gas Naturale [Sm <sup>3</sup> ]	Olio Greggio [kg]	Gasolina [kg]
2,414 · 10 <sup>6</sup>	$441\cdot 10^6$	$780\cdot 10^3$

Tabella 1 – produzione nazionale di idrocarburi (attività offshore).

Le strutture marine utilizzate nell'offshore italiano contano 139 piattaforme [8] di cui 9 inattive, 120 di produzione e 10 di supporto. Tra le piattaforme di produzione esistenti il 90% si dedica alla produzione di gas, mentre il restante 10 % alla produzione di olio. Il contributo al soddisfacimento del fabbisogno energetico nazionale è rispettivamente del 10% e del 7%. Le piattaforme impiegate nel contesto offshore italiano si possono riassumere nelle tecnologie elencate di seguito (ibid.):

- piattaforme con struttura emersa e teste pozzo sottomarine (137 unità);
- unità galleggianti di stoccaggio temporaneo (2 unità).

Le piattaforme marine sono ubicate nelle zone indicate dai simboli colorati in Figura 3 [9]. Il rosso rappresenta le piattaforme di supporto, il grigio le piattaforme inattive, il giallo le piattaforme che producono gas naturale e le verdi indicano le unità di produzione di olio. La linea verde traccia i confini tra la zona costiera entro cui non è possibile installare le piattaforme e quella in cui invece è consentito un loro collocamento. Essa è stata definita a seguito del Decreto Legislativo del 3 Aprile 2006 n.152 il quale stabilisce il divieto di collocazione di nuove piattaforme nelle zone di mare poste entro dodici miglia dalle coste. Allo stato dell'arte sono ben 94 le piattaforme che operano entro le 12 miglia.



Figura 3 – Ubicazione delle strutture offshore italiane [9].

Le piattaforme sono geograficamente concentrate in due zone: l'alto Adriatico e il Canale di Sicilia. Siccome la stragrande maggioranza di piattaforme si colloca nella prima area citata, si è sfruttata questa indicazione per la scelta delle condizioni climatiche medie da ipotizzare per il dominio della piattaforma oggetto di studio. Qui solitamente, in base ai dati statistici disponibili [10] la velocità del vento registrata a 25 m sopra il livello del mare varia nel range  $3 \div 7$  m/s.

#### 1.2.1 Quadro Normativo

Il quadro normativo italiano in materia di sicurezza delle operazioni offshore è principalmente costituito da due direttive europee:

- Direttiva 2012/18/UE (Direttiva Seveso III);
- Direttiva 2013/30/UE.

La **Direttiva Seveso III** è stata emanata con lo scopo di controllare il pericolo di incidenti rilevanti nell'ambito di tutte quelle attività in cui è previsto l'utilizzo di sostanze pericolose.

Con tale direttiva è stata abrogata la precedente direttiva 96/82/CE e in Italia è stata recepita tramite il D. Lgs 26 Giugno 2015 n 105. La direttiva prende il nome dall'incidente di Seveso, nel quale si verificò la dispersione di una nube tossica di una diossina nota come TCDD (Tetracloro-dibenzo-diossina). Le novità introdotte dalla nuova direttiva sono molteplici. Innanzitutto, si prepone di allineare al regolamento CLP la classificazione delle sostanze e delle miscele pericolose. Il fine è quello di armonizzare il sistema di individuazione e catalogazione dei prodotti chimici all'interno dell'Unione europea con quello adottato a livello internazionale in ambito ONU (GHS - *Globally Harmonised System of Classification and Labelling of Chemicals*). Oltre ad adeguare i sistemi di classificazione, essa stabilisce [11]:

- l'obbligo di includere tra gli scenari incidentali anche gli eventi provenienti da cause naturali come terremoti e inondazioni;
- il dovere di informare opportunamente i cittadini sui rischi delle attività degli impianti industriali "Seveso" circostanti e sulle azioni da intraprendere in caso di incidente.

Gli incidenti avvenuti in passato in ambito Oil & Gas sono numerosi e hanno portato a danni irreversibili. In seguito all'incidente occorso al pozzo Macondo nel Golfo del Messico, la Commissione europea ha avviato delle analisi atte a verificare che le norme adottate dagli Stati Membri in materia offshore garantissero la sicurezza delle operazioni. A seguito di questo studio è stata emanata la Direttiva 2013/30/UE recepita dal D. Lgs. 145/2015, spesso conosciuta come "Direttiva Offshore". Il nuovo decreto ha apportato delle modifiche alla direttiva precedente 2004/35/CE in merito alla sicurezza delle operazioni in mare connesse all'estrazione e produzione degli idrocarburi. Nella Direttiva Offshore [12] sono fissati i requisiti minimi per evitare i major accidents durante le operazioni in mare e per limitare le conseguenze di tali eventi. Con questa direttiva, vengono regolamentate le responsabilità dell'operatore dell'impianto. Egli deve redigere un documento in cui delinea gli scenari incidentali che possono verificarsi all'interno dell'impianto e inserire una valutazione sugli impatti ambientali correlati ai singoli scenari. In questo modo l'operatore sarà in grado di formulare un piano di emergenza interno e implementare i sistemi di prevenzione utili a prevenire gli incidenti rilevanti. Nel caso in cui si verificasse un major accident, l'operatore è tenuto ad informare immediatamente tutti i membri dell'Unione Europea, fornendo i dati relativi all'ora, il luogo e alla grandezza dell'impatto (ibid.).

#### 1.2.2 Attività di ricerca in ambito offshore

A seguito del D. Lgs 145/2015 nasce la collaborazione tra il MiSE e il Politecnico di Torino, con l'obbiettivo di aumentare la sicurezza e minimizzare il rischio di incidenti rilevanti in ambito offshore. Nel 2018 è stato firmato un accordo che prevede lo sviluppo di un polo multidisciplinare per la crescita della ricerca in ambito della sicurezza offshore, il SEASTAR (*Sustainable Energy Applied Sciences, Technology & Advanced Research*) [13]. Come ha dichiarato l'allora Direttore generale per la sicurezza ambientale delle attività minerarie ed energetiche:

"Il SEASTAR intende porsi come riferimento internazionale sul tema della sicurezza Oil & Gas, in particolare offshore, e della gestione di questo ambito nella transizione verso un futuro low-carbon" (ibid.).

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

Il SEADOG nasce nel 2015 come un gruppo di ricerca atto a creare delle attività di formazione e supporto sulla sicurezza offshore. La ricerca sulla sicurezza industriale in ambito offshore all'interno del SEADOG si basa su un approccio basato sull'analisi di rischio. Fra i diversi filoni di ricerca attualmente aperti, lo sviluppo di un modello CFD, realizzato in ANSYS Fluent, mirato ad indagare il fenomeno di rilascio di materiali infiammabili e/o tossici sulle piattaforme offshore, è un supporto indispensabile per indagare efficacemente le aree di danno di uno scenario incidentale, in modo da non portare a elevati sovradimensionamenti dei sistemi di sicurezza in ambienti fortemente congestionati e rendere l'analisi di rischio uno strumento ancora più efficace per il design di impianti industriali.

All'interno del lavoro di tesi ci si è focalizzati nel miglioramento, in termini di costo computazionale, delle tecniche di simulazione degli incidenti nell'ambito della valutazione quantitativa delle conseguenze (QRA). Nel paragrafo 1.5 sono meglio chiariti gli obbiettivi della presente tesi.

#### **1.3 QRA in ambito offshore**

Le attività di estrazione e produzione di idrocarburi, già nel contesto *onshore*, sono soggette al verificarsi dei cosiddetti *major accidents*, ovvero quegli eventi incidentali con il potenziale di arrecare gravi danni alla vita e alla salute del personale, all'ambiente e all'asset dell'impianto. Svolgere le suddette operazioni in un ambiente *offshore* comporta il sommarsi di problematiche relative alle condizioni climatiche avverse (tempeste marine, impatto della struttura portante con i moti ondosi), alle collisioni con altri vessels e i collassi strutturali dovuti alla perdita di resistenza per cicli a fatica chimica (corrosione) e meccanica. Si aggiunga poi la difficoltà di contenimento degli eventi catastrofici. Incidenti come quello di Deep Water Horizon nel pozzo Macondo del Golfo del Messico, dell'esplosione e dell'incendio della piattaforma inglese Piper Alpha, il capovolgimento della piattaforma Alexander Kielland e della canadese Ocean Ranger e l'allagamento della GBD norvegese Sleipner A costituiscono un chiaro esempio.

La *Risk Analysis* è una disciplina che si occupa di identificare i pericoli connessi a una determinata attività e di quantificare il rischio per i peggiori scenari contemplati. Il rischio è una grandezza che rappresenta quanto distanti si è dalla condizione ideale di sicurezza e può essere quantificato come:

$$R = f \cdot X$$

Dove f rappresenta la frequenza di accadimento di un certo evento (eventi all'anno) e X la stima delle conseguenze, ovvero la gravità che comporta l'incidente analizzato. Il rischio può essere valutato in funzione di tre ambiti principali: l'ambiente, la salute delle persone e l'asset dell'impianto.

La metodologia generalmente utilizzata per valutare questa grandezza è riassunta nello schema di Figura 4 [14]. I primi step prevedono una valutazione qualitativa del rischio, basata sull'esperienza del personale e non su stime matematiche. In base alla configurazione dell'impianto da analizzare è possibile impostare le procedure volte all'identificazione delle possibili sorgenti di danno o condizioni di operazione che deviano da quelle prestabilite: in altre parole si svolge una ricerca sulle potenziali situazioni di pericolo. Al termine di queste procedure si stabiliscono i pericoli più critici assegnando un rischio qualitativo tramite le cosiddette matrici di rischio: le situazioni etichettate come non critiche vengono scartate generalmente, per potersi concentrare sulle più pericolose. A questo punto ha inizio la procedura quantitativa del rischio, o altrimenti detta QRA (Quantitative Risk Assessment). Quest'ultima è la tecnica utilizzata dagli ingegneri per prevedere i rischi incidentali connessi a una determinata attività e fornire a valle delle valutazioni delle linee guida atte a minimizzare il rischio. Sempre in riferimento a Figura 4, le fasi di valutazione prevedono (ibid.) di eseguire un'analisi delle frequenze di accadimento e in parallelo una modellazione delle conseguenze. La prima è effettuata tramite tecniche come ETA, FTA e RBD in grado di sviluppare, a partire da un evento iniziatore di riferimento (RIE) le possibili evoluzioni incidentali. La seconda consiste nella modellazione del fenomeno incidentale ed è la fase di cui ci si occupa in questa trattazione. A questo punto si valuta l'entità del rischio e l'output di tale analisi consiste nel definire il rischio accettabile o meno. Qualora il rischio fosse inaccettabile si può scegliere se intervenire abbassando la frequenza e quindi implementando sistemi di prevenzione o se abbassando l'entità del danno e quindi servendosi di tecniche di mitigazione.



Figura 4 – Schema della metodologia dell'analisi di rischio [14].

Si è detto precedentemente che la fase di simulazione degli incidenti, in cui avviene la stima deterministica dei danni causati dalla sequenza incidentale, è un passo fondamentale per il calcolo del rischio connesso a una certa attività. L'output di questa analisi serve per comprendere la dimensione del fenomeno e l'estensione della zona danneggiata. Ciò che si ottiene infatti, sono mappe che riportano le aree potenzialmente danneggiabili dal fenomeno fisico considerato. Gli effetti fisici relativi ad uno specifico scenario possono essere espressi in termini di:

- Mappe di intensità (per incendi);
- Mappe di sovrappressione (esplosioni);
- Profili di concentrazione (dispersioni tossiche).

Per poter simulare le sequenze incidentali bisogna modellizzare correttamente il fenomeno incidentale. Per fare ciò generalmente si procede dividendo lo scenario incidentale in fenomeni elementari. Per ciascuno di questi sotto-modelli bisogna capire a cosa si è realmente interessati e come ottenere le grandezze di rilievo.

Il campo della modellazione dei rilasci di idrocarburi è altamente sviluppato ed esistono diversi programmi usati commercialmente per modellare le perdite, le dispersioni, gli incendi e le esplosioni di gas e liquidi. Molte delle tecniche esistenti sono semplici e sono sviluppate all'interno di fogli di calcolo [15] che, una volta inseriti gli input, forniscono gli output di interesse. Tuttavia, la modellazione dei rilasci fortemente influenzati dalla presenza di ostacoli in ambienti congestionati richiede l'utilizzo di approcci molto più sofisticati, tra cui i modelli numerici.

Per le analisi in spazi molto confinati, come il caso delle piattaforme offshore, o per le analisi post-incidentali si è soliti utilizzare strumenti di fluidodinamica computazionale o altrimenti detti CFD. L'area della *consequence modelling* presenta dei punti deboli (ibid.), i quali possono essere di seguito riassunti:

- I modelli a disposizione sono principalmente deterministici e rappresentano le varie possibilità in funzione di scenari discreti. Questo approccio può portare a una stima inaccurata del rischio reale;
- La possibilità di ottenere risultati molto precisi è controbilanciata dalla grande incertezza con cui si ipotizzano i parametri di input, come per esempio le dimensioni del foro di rilascio, i ritardi di ignizione, etc;
- Molti modelli sono sensibili alle variazioni del layout dell'impianto, il quale spesso non è ancora stabilito con certezza durante le valutazioni QRA;
- I modelli che non prevedono un'adeguata rappresentazione della geometria portano a un elevato sovradimensionamento dei sistemi di sicurezza, soprattutto in ambienti congestionati come le piattaforme, dove si preferisce adottare un metodo conservativo. Il sovradimensionamento delle protezioni implica un incremento dei carichi e dei costi.

Per questi motivi la QRA è oggetto di studio per cercare di renderla una disciplina sempre più accurata nella gestione dei rischi: sia dal punto di vista della mitigazione che dal punto di vista della prevenzione. La ricerca in questo ambito si sta orientando verso una QRA dinamica, cioè in grado di delineare le variazioni del rischio nel tempo [16].

Il contributo della presente tesi vuole essere quello di apportare un miglioramento dell'ultimo punto di debolezza segnalato, in modo da rendere l'analisi del rischio uno strumento ancora più efficace per il design degli impianti offshore. Per comprendere più a fondo la metodologia adottata dalla trattazione, si faccia riferimento al paragrafo 1.5.

## 1.4 Strumenti di modellazione

In questo paragrafo si vuole accennare a due ambiti di modellazione: la fluidodinamica computazionale e la meta-modellazione. La CFD ad oggi costituisce uno strumento spesso utilizzato per la simulazione di scenari incidentali, mentre l'utilizzo di modelli surrogati costituisce una nuova frontiera per poter migliorare le attuali strategie e tempistiche di calcolo. Nonostante lo scarso utilizzo di questi modelli nell'ambito dell'analisi del rischio, essi sono largamente studiati nell'ambito ingegneristico.

#### 1.4.1 Modelli CFD

La fluidodinamica computazionale è una branca della meccanica dei fluidi che si avvale dell'analisi numerica per risolvere problemi relativi al moto dei fluidi e all'interazione di questi ultimi con l'ambiente in cui sono modellizzati. L'esigenza di ricorrere a questi modelli risiede nel fatto che i fenomeni studiati sono regolati da equazioni differenziali parziali, le quali non possono essere risolte analiticamente nella stragrande maggioranza dei casi. Queste tecniche consentono di ottenere una soluzione numerica, ovvero un'approssimazione della reale soluzione. Per ottenere tale soluzione bisogna ricorrere a metodi di discretizzazione, i quali consentono di approssimare le PDEs con un sistema di equazioni algebriche. Esistono molti approcci, tuttavia i più utilizzati sono [17] [18]:

- Differenze finite (FD);
- Elementi finiti (FE);
- Volumi finiti (FV).

L'ultima tipologia di discretizzazione è quella utilizzata all'interno del software di nostro interesse, ANSYS Fluent. Le analisi ai volumi finiti consentono di scomporre il dominio in un numero finito di volumi di controllo: il centro di ogni volume di controllo/cella costituisce l'incognita discreta del sistema algebrico. La collocazione di tali variabili dipende dalla griglia numerica scelta per il particolare problema. a griglia di calcolo è la rappresentazione discreta del dominio computazionale e serve a definire i punti geometrici in cui il software risolve le equazioni di conservazione. Tra le diverse tipologie esistenti figurano le griglie strutturate e le griglie non strutturate. Le prime possono essere identificate da una terna cartesiana, mentre le seconde non sono regolari.

Le tecniche di simulazione numerica di cui si avvale la fluidodinamica computazionale per modellare la turbolenza servono a predire il complesso comportamento dei flussi quando soggetti al fenomeno di turbolenza. Una prima classificazione delle tecniche numeriche esistenti è la seguente:

- DNS (Direct Numerical Simulation);
- LES (Large Eddy Simulation);
- RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes).

Le simulazioni DNS sono basate sulla risoluzione numerica delle equazioni di Navier-Stokes, senza il bisogno di adottare modelli approssimativi per rappresentare la turbolenza. Questo implica un costo computazionale elevato, in quanto questa tecnica include la rappresentazione di tutte le scale di turbolenza: dalle micro-scale di Kolmogorov alle scale integrali caratterizzate alle componenti del moto con maggior energia cinetica [17]. Le simulazioni RANS, al contrario, utilizzano modelli matematici in grado di approssimare il fenomeno della turbolenza. Esse sfruttano la media temporale delle equazioni di Navier Stokes per eliminare la componente fluttuante dalle proprietà del flusso. Tuttavia, questa operazione porta alla generazione di componenti (flussi di quantità di moto) che agiscono come sforzi di taglio sul flusso e che non sono note a priori [19]. Queste componenti costituiscono delle incognite e pertanto necessitano un trattamento modellistico, ovvero la risoluzione di equazioni aggiuntive per la chiusura del problema matematico. Infine, le simulazioni LES si interpongono tra una modellazione di carattere più approssimativo (RANS) e una simulazione numerica diretta (DNS).

Ai fini della trattazione si è scelto di analizzare in dettaglio i soli modelli appartenenti alla categoria RANS, in quanto la presente tesi si colloca nel contesto delle simulazioni di incidenti previste dall'analisi di rischio. Le tempistiche legate alla redazione di tale documento non sono sicuramente compatibili con l'onere computazionale previsto dai modelli LES o DNS. I modelli che si basano sull'approccio RANS possono essere racchiusi essenzialmente in quattro categorie [17]:

- Modelli a zero equazioni o algebrici (Prandtl-Von Karma, etc);
- Modelli a un'equazione (Spalart-Allmaras, etc);
- Modelli a due equazioni (k- $\varepsilon$ , k- $\omega$ ...);
- Reynolds Stress Transport.

Il modello a un'equazione è caratterizzato dalla risoluzione di un'equazione di trasporto addizionale rispetto alle equazioni di Navier-Stokes per poter completare la chiusura del problema. Solitamente l'equazione addizionale coinvolge l'incognita k, ovvero l'energia cinetica turbolenta. I modelli a due equazioni invece, per risolvere il problema della chiusura, utilizzano due equazioni di trasporto aggiuntive. Solitamente un'equazione serve per trovare l'energia cinetica turbolenta, l'altra varia a seconda del modello di turbolenza utilizzato. Essi costituiscono i modelli più utilizzati in quanto rappresentano il giusto compromesso fra costo computazionale e accuratezza della soluzione. Il modello k- $\varepsilon$ utilizza le equazioni differenziali di trasporto dell'energia cinetica turbolenta (k) e del suo rateo di dissipazione (ɛ). Il modello è largamente impiegato e validato per flussi caratterizzati da complesse zone di ricircolo, ma presenta difficoltà di predizione in presenza di forti gradienti avversi di pressione. Il modello k-w utilizza le equazioni differenziali di trasporto dell'energia cinetica turbolenta (k) e la velocità di dissipazione specifica ( $\omega$ ). Il modello k- $\omega$  al fine di tale tesi risulta migliore del modello k- $\varepsilon$  perché permette di modellare con maggiore precisione gli strati limite e le zone affette da gradienti di pressione [19]. Un modello più vantaggioso è il k-w SST, un modello ibrido tra k-e e k- $\omega$  che combina le equazioni di  $\omega \in \varepsilon$  tramite un fattore moltiplicativo noto come *blending*. Questo fattore permette di sfruttare i vantaggi dei due modelli k- $\omega$  e k- $\varepsilon$ . Infatti, il k- $\omega$  SST si comporta come il  $k-\omega$  nei pressi di una parete e come il  $k-\varepsilon$  lontano dalla parete. La scelta del modello da utilizzare è fondamentale e dipende dalla fisica che si vuole simulare, l'accuratezza che si vuole ottenere e il tempo a disposizione. Tenendo in considerazione i lavori precedenti al presente [20] [21] [22] [23] si è scelto di utilizzare il k- $\omega$  SST.

#### 1.4.2 Modelli di ordine ridotto ROMs

Al giorno d'oggi il mondo delle simulazioni o più in generale delle scienze computazionali rappresenta un ambito che si pone a completamento delle conoscenze teoriche e delle ricerche sperimentali. Infatti, questa disciplina permette di formulare predizioni sul comportamento di un certo fenomeno basandosi sulle conoscenze teoriche, soprattutto nei casi in cui gli esperimenti non sono eseguibili (fenomeni catastrofici). Le potenzialità sono sfruttate in ogni campo ingegneristico. Nelle applicazioni industriali le scienze computazionali offrono la possibilità di progettare prodotti in maniera ottimale e affidabile senza l'esigenza di costruire costosi prototipi. Nonostante le simulazioni di sistemi complessi siano sostenute dal continuo progredire delle capacità computazionali delle macchine e dal miglioramento delle tecniche numeriche, la richiesta di simulazioni sempre più realistiche comporta un intenso onere computazionale.

Molti dei problemi che una volta erano impensabili da risolvere, al giorno d'oggi sono risolti continuamente. Negli anni 60 e 70 ad esempio, per risolvere problemi di una certa complessità bisognava essere in grado di costruire adeguate funzioni di base, mentre ora basta creare una griglia di calcolo rifinita laddove ci si aspetta di catturare fenomeni predominanti. Tuttavia, negli ultimi anni le simulazioni sono diventate talmente onerose che ci si è posti un quesito: è possibile utilizzare le informazioni fornite da queste simulazioni per generare delle particolari funzioni di base in grado di ridurre la complessità del problema?

Per rispondere a tale domanda bisogna prima mettere in luce la seguente questione. Per comprendere un fenomeno fisico complesso, non è necessario che esso sia definito e calcolato in ogni particolare [24]. Alcuni aspetti possono essere trascurati per ragioni fisiche formulate a priori. Un tipico esempio è fornito dalle pubblicazioni di A. Quarteroni in [25] in merito al flusso sanguigno. Egli dimostra che scomponendo il problema globale in tanti piccoli sotto-problemi è possibile ridurre la complessità del problema originario. Il deflusso in piccole arterie si ipotizza essere di natura unidimensionale. Nelle arterie contraddistinte da diametro maggiore il fenomeno diventa 2D e si evolve in 3D una volta raggiunto il cuore. Questo approccio, diffuso in molte aree ingegneristiche, è conosciuto come *operational model order reduction* e si basa sulla riduzione della complessità basandosi su intuizioni fisiche. Tuttavia, in molti altri casi non è possibile formulare a priori delle semplificazioni. In questi casi bisogna affidarsi a degli algoritmi in grado di identificare automaticamente le semplificazioni potenzialmente utili al problema. Provvedere alla formulazione di tali algoritmi è ciò che sta alla base della *Model Order Reduction* [24].

Lo scopo principale di tali modelli è quello di catturare le features essenziali dei fenomeni in gioco. Ovvero partendo da un modello sofisticato, come può essere quello della CFD, bisogna ridurne la complessità fino a un ordine di accuratezza. Nel modello semplificato è necessario che tutte le proprietà essenziali del modello di partenza siano approssimate con un errore accettabile. In Figura 5 è illustrato lo *Stanford Bunny* (ibid.), una raffigurazione molto efficace del processo di *model order reduction*: ciò che vuole far emergere è che spesso bastano poche informazioni per capire di cosa si tratta, infatti anche una rappresentazione più approssimativa del coniglio permette di riconoscerlo.



Figura 5 – Stanford Bunny [24].

Questi strumenti sono spesso utilizzati nella modellazione dei fluidi, che costituisce da sempre una sfida ingegneristica. Ridurre la complessità dei fenomeni fluidodinamici infatti, richiede parecchia attenzione, in quanto:

- Sono caratterizzati da forti non-linearità;
- Molti problemi sono tempo dipendenti;
- I fenomeni coinvolti possono essere di natura multi-fisica e/o multifase.

I modelli ROM sono spesso applicati alle equazioni parametrizzate di Navier-Stokes, che descrivono la maggior parte dei deflussi. La sfida nella rappresentazione delle Navier-Stokes risiede anche nel fatto che le soluzioni di tali equazioni mostrano fenomeni complessi sia su scala temporale che su scala spaziale. Principalmente esistono due tipologie di algoritmi in grado di scegliere le basi su cui costruire i modelli ROM:

- Proper Orthogonal Decomposition (POD);
- Reduced Basis Methods (RB).

Nonostante esse abbiano delle caratteristiche comuni, sono state introdotte per far fronte a due problemi diversi. Il metodo POD generalmente si applica per costruire le basi nei problemi dipendenti dal tempo, mentre i metodi RB trovano applicazione nella costruzione di basi nei problemi parametrici. In molte applicazioni il problema fluidodinamico può dipendere anche da un certo numero di parametri. In questo caso si a che fare con un ROM parametrico [26].

## 1.5 Punti di partenza, obbiettivi e metodologia della tesi

Il presente lavoro di tesi si inserisce nel contesto della produzione offshore di idrocarburi e in particolare di gas naturale. Il lavoro di tesi si basa sulla simulazione CFD di diversi scenari incidentali all'interno di un deck di produzione di una tipica piattaforma petrolifera italiana. Gli eventi incidentali simulati riguardano una fuoriuscita di metano altamente pressurizzato che, a seguito della fase di rilascio vera e propria, si disperde nel dominio degli impianti di produzione. L'approccio utilizzato per simulare il rilascio incidentale è quello previsto dal modello elaborato dal laboratorio SEADOG del Politecnico di Torino che prende il nome di SBAM (*Source Box Accident Model*). Questo approccio innovativo permette di scomporre il fenomeno di rilascio in due "step": rilascio e dispersione.

La presente tesi si concentra sul rilascio e, dunque, sulla simulazione della Source-Box. Per poter sfruttare il potenziale del modello a due step, si vuole valutare la fattibilità di una libreria di Source Box, ovvero un catalogo contenente i profili di velocità e di concentrazione provenienti dalle simulazioni di rilascio incidentale. Questo consentirebbe di realizzare una simulazione di dispersione senza la necessità di simulare per ogni caso anche la prima parte del fenomeno, che è già resa disponibile, scegliendo dalla libreria i risultati della Source Box più aderente al caso oggetto dello studio. La creazione di questo catalogo, tuttavia, risulta essere estremamente onerosa a livello di risorse computazionali, vista la dimensione dello spazio dei parametri in gioco. Una soluzione per ridurre l'onere computazionale risiede nell'utilizzo di un modello surrogato della CFD, il meta-modello P-NIROM sviluppato da [27]. L'obbiettivo del lavoro risiede nel testare le capacità predittive del meta-modello per comprendere se il suo utilizzo sia la strada corretta per popolare la libreria di Source Box. Un ulteriore obbiettivo consiste sicuramente nel capire come e con quante simulazioni addestrare il meta-modello e nell'analizzare strade per diminuire gli errori dei profili ottenuti dal P-NIROM, in modo da fornire all'analista del rischio dei risultati quanto più accurati possibile.

La metodologia con cui sono stati perseguiti gli obbiettivi segnalati precedentemente può essere così riassunta. Innanzitutto, si è svolta un'adeguata ricerca bibliografica volta all'approfondimento dello stato dell'arte delle tecniche di modellazione degli scenari incidentali e alla conoscenza più dettagliata dei fenomeni fisici coinvolti nei *case study* analizzati. Dopo aver acquisito le informazioni essenziali, si è da subito individuato il parametro cardine da far variare da una simulazione all'altra: la pressione di rilascio. A questo punto si sono distinti i case study in set di validazione e in set di addestramento. Al primo set appartengono le simulazioni con cui si confrontano i risultati del meta-modello e quindi la bontà dello stesso, mentre al secondo si associano i punti di addestramento di cui necessita il meta-modello per generare delle soluzioni approssimate quanto più accurate possibile.

Al contrario di quanto si possa pensare, si è partiti con il definire le simulazioni appartenenti al set di validazione. Questa strategia ha permesso di generare una griglia di calcolo estremamente flessibile nel range di pressioni di rilascio investigato e quindi di analizzare i fenomeni fisici che si sviluppano all'interno della *Source Box* all'aumentare della pressione di rilascio. Una volta stabilita la correttezza dei risultati CFD, si è scelto di campionare i punti di addestramento secondo l'algoritmo di Smolyak: esso consente di trovare i punti ottimali di addestramento, i quali vengono suddivisi in più livelli innestati fra loro. L'adozione di questo metodo di campionamento conferisce al meta-modello la caratteristica di adattività, ovvero la possibilità di essere addestrato in step successivi senza la necessità di stabilire a priori il numero di simulazioni sufficienti per una buona approssimazione. La strategia pertanto, si può così riassumere:

- implementazione dell'i-esimo livello di punti di addestramento;
- validazione preliminare in cui si confrontano i risultati ottenuti dal meta-modello con il set di validazione proveniente dalla CFD.

Qualora l'errore non fosse ritenuto accettabile, si implementa il livello successivo della griglia di Smolyak durante la fase di addestramento. Questo procedimento è iterativo e si conclude quando si raggiunge il grado di accuratezza desiderato. Non esiste un metodo globalmente valido per stabilire quale sia il grado di accuratezza da raggiungere, ogni caso infatti deve essere valutato separatamente. Nella presente trattazione, che si inserisce nel contesto dell'analisi del rischio, si è ritenuto opportuno valutare come l'errore di approssimazione del meta-modello influisca sul volume di infiammabile presente sulla piattaforma. Questa grandezza è fondamentale e necessaria per valutare le conseguenze di un possibile innesco o esplosione della miscela.

Solo a valle delle analisi citate è possibile stabilire se le potenzialità del meta-modello possono effettivamente apportare un miglioramento alle attuali tecniche di modellazione delle conseguenze. Una risposta positiva porta alla questione successiva, ovvero valutare in che modalità sfruttare la risorsa: per popolare un catalogo di *Source Box* o per essere utilizzato in diretta.

# Capitolo 2 Rilasci gassosi tra fisica e modelli

Il presente capitolo descrive sia da un punto di vista qualitativo che quantitativo i fenomeni fisici coinvolti nell'evento incidentale da modellizzare. Questi fondamenti teorici sono utili sia per selezionare adeguatamente i modelli all'interno del solver fluidodinamico, sia per formulare previsioni consistenti sulla soluzione numerica. La trattazione si conclude con un approfondimento sull'approccio scelto per rappresentare l'evento incidentale, ovvero il *Source Box Accident Model* (SBAM).

#### 2.1 Fisica del rilascio gassoso

Il fenomeno incidentale consiste in un rilascio di metano che, considerato l'ambiente congestionato quale è la piattaforma (zona ricca di componenti di processo che si comportano da ostacoli), investe una tubazione adiacente per poi disperdersi nelle aree limitrofe del deck tra gli ostacoli presenti e poi in mare aperto. Per poter caratterizzare dal punto di vista fisico l'evento incidentale, e in particolare la fase iniziale del rilascio, è utile accennare alle leggi che regolano i fluidi comprimibili supersonici. In particolare, in questo paragrafo si approfondiscono i principali fenomeni che hanno luogo durante il rilascio di metano (teoria dei getti sottoespansi, aerodinamica dei corpi investiti da un flusso turbolento) e gli strumenti fittizi utilizzati per rendere la modellazione fedele alla realtà (ugello semplicemente convergente).

#### 2.1.1 Fluidi comprimibili

La velocità di un flusso influisce sulle proprietà di quest'ultimo in molteplici modi ed è per questo motivo che nella fluidodinamica spesso si utilizzano numeri adimensionali (Reynolds, Mach, etc) rappresentanti l'importanza delle forze d'inerzia per definire il regime di un flusso. Basse velocità caratterizzano flussi in cui lo scorrimento viscoso predomina sui fenomeni di inerzia (flusso di Stokes). Aumentando la velocità, gli effetti inerziali diventano sempre più rilevanti: in corrispondenza del numero di Reynolds critico si passa da moto laminare a moto turbolento, le cui traiettorie sono influenzate da vortici e ricircolazioni. Confrontando invece la velocità del fluido con la velocità del suono (numero di Mach) si determina se i gradi di libertà delle molecole del fluido cambiano drasticamente

o meno, ovvero se un flusso può essere considerato comprimibile (Ma > 0.3) o incomprimibile. Qualora il numero di Mach raggiungesse valori superiori all'unità il regime subirebbe una transizione da subsonico a supersonico, dove il fluido è soggetto alle cosiddette onde di shock.

Le equazioni che governano il moto dei fluidi newtoniani incomprimibili sono conosciute con il nome di Navier-Stokes e comprendono le equazioni di conservazione della massa e della quantità di moto. Per quanto riguarda i fluidi comprimibili, la completa descrizione dello stato termodinamico avviene risolvendo oltre alle già citate Navier-Stokes, l'equazione dell'energia, in quanto la densità è ora un'incognita addizionale del problema. Esistono diverse forme, equivalenti, con cui esprimere questi set di equazioni tra cui la forma integrale e la forma differenziale. Quest'ultima si ottiene applicando il teorema della divergenza di Gauss alla forma integrale ed è quella che si è scelto di utilizzare per la presente trattazione.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \tag{2.1}$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u V) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho f_x + (F_x)_{viscous}$$
(2.2 a)

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v V) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho f_y + (F_y)_{viscous}$$
(2.2 b)

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho wV) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho f_z + (F_z)_{viscous}$$
(2.2 c)

L'equazione 2.1 rappresenta la conservazione della massa ed è stata ricavata ipotizzando che il fluido sia un mezzo continuo. Le equazioni 2.2 a-c rappresentano la variazione nello spazio e nel tempo delle componenti scalari della quantità di moto lungo le tre direzioni x, y, z. La variazione nello spazio è espressa tramite la divergenza del flusso della quantità di moto, composta da tre termini caratterizzati da diversa natura fisica e formulazione matematica. Il termine al primo membro, contraddistinto dalla divergenza della velocità, è chiamato *advection* e descrive come il campo di moto V viene trasportato macroscopicamente dalla componente scalare della quantità di moto. Il termine (F)<sub>viscous</sub> rappresenta il trasporto della quantità di moto a livello microscopico per azione delle forze viscose e prende il nome di *diffusion* [19]. La divergenza della pressione infine è conosciuta come *pressure-velocity coupling*, termine che sottolinea come il campo di moto non possa essere determinato indipendentemente dal campo di pressione.

Per quanto riguarda i fluidi comprimibili si è detto che la densità costituisce una variabile aggiuntiva del problema, motivo per cui oltre alle Navier-Stokes bisogna risolvere l'equazione dell'energia:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \rho \left( e + \frac{V^2}{2} \right) \right] + \nabla \cdot \left[ \rho \left( e + \frac{V^2}{2} \right) V \right] = \rho \dot{q} - V \cdot (pV) + \rho (f \cdot V) + \dot{Q'}_{vis} + \dot{W'}_{vis}$$
(2.3)

Una volta definite le leggi che regolano il comportamento dei fluidi comprimibili, si analizzano i flussi supersonici. I fluidi caratterizzati da regioni supersoniche sono soggetti a onde di shock, ovvero regioni dello spazio estremamente sottili attraverso cui le proprietà del fluido cambiano drasticamente [28]. Le onde di shock si manifestano sia sottoforma di onde di espansione che di compressione.



Figura 6 – Onde di shock di compressione e di espansione [28].

Le onde di shock che caratterizzano un flusso supersonico derivano dalla presenza di perturbazioni lungo le traiettorie delle particelle. Le sorgenti di tali perturbazioni possono essere costituite per esempio da una variazione della geometria entro cui evolve un flusso, come illustrato in Figura 6. L'immagine sulla sinistra raffigura il caso in cui un flusso supersonico incorre in una parete concava con un angolo di deflessione  $\theta$ . Il flusso a parete dovrà chiaramente rimanere tangente ad essa, quindi, perché ciò avvenga la linea di flusso aderente alla parete sarà deviata di un angolo  $\theta$ , così come il resto delle *streamlines*. Ogni qual volta le streamlines di un flusso supersonico vengono deviate verso il bulk del fluido, si verifica un'onda d'urto obliqua. Attraverso l'onda d'urto il numero di Mach decresce in maniera discontinua mentre la pressione, la densità e la temperatura aumentano. L'immagine sula destra invece illustra il fenomeno di espansione. Il flusso supersonico in questo caso incorre in una parete convessa e le streamlines saranno deviate "lontano" dal bulk del fluido, dando origine alle onde d'espansione che si presentano sottoforma di un ventaglio di espansione centrato nell'angolo (ibid.). Attraverso queste onde il Mach aumenta, ma la pressione, la densità e la temperatura diminuiscono. Il ventaglio di espansione è una regione composta da una continua successione di onde di Mach limitate dalla forward Mach line e dalla rearward Mach line. Il fenomeno evolve secondo una trasformazione isoentropica, in antitesi con il flusso che attraversa un'onda di compressione, il quale sperimenta sempre un incremento di entropia.

Il fenomeno fisico per cui si formano le onde di shock riguarda la propagazione delle perturbazioni di pressione per mezzo di collisioni molecolari. Quando un flusso viene perturbato, anche lievemente, l'informazione di tale perturbazione viene trasmessa agli altri elementi di fluido tramite onde sonore che si propagano in tutte le direzioni alla velocità del suono locale. Se il flusso a monte della perturbazione è in regime subsonico, le onde riescono a trasportare senza problemi l'informazione. Se però il regime del flusso è supersonico, le onde non possono propagarsi ulteriormente: per questo motivo a una certa distanza dalla sorgente di disturbo queste onde si accumulano e coalescono, dando forma a un'onda d'urto.

Si prova ora a capire come variano le proprietà del flusso che interagiscono con un'onda d'urto. Innanzitutto, si è soliti distinguerle in onde oblique e onde normali, anche se queste ultime costituiscono un caso particolare delle onde d'urto oblique per cui  $\beta = 90^{\circ}$ . Le onde normali sono caratterizzate da una maggiore intensità rispetto alle oblique, infatti il regime del flusso a valle di tali fenomeni è necessariamente subsonico. Per quanto riguarda l'entropia invece, essa aumenta sempre attraverso un'onda d'urto, in quanto al fronte d'onda si sviluppano alti gradienti di velocità e temperatura, i quali innescano meccanismi prettamente dissipativi (forte viscosità, conduzione del calore) che tendono ad innalzare il valore di entropia. Per una visualizzazione grafica di come le grandezze vengano perturbate nei due casi, si faccia riferimento alla Figura 7.



Figura 7 – onda d'urto obliqua (sinistra) e normale (destra) [28].

#### 2.1.1.1 Ugello semplicemente convergente

Il rilascio di gas pressurizzato da un foro è rappresentato mediante un efflusso attraverso un condotto semplicemente convergente. Si sottolinea che questo componente è di natura fittizia ed è inserito nel dominio della SB con lo scopo di replicare le reali condizioni di fuoriuscita del gas. Questo approccio è stato validato da C. Rupolo [22]. L'autore ha introdotto nel modello della SB un ugello convergente che ha dimostrato di risolvere le problematiche da egli riscontrate, ovvero la mancata visualizzazione delle onde di shock e una corretta evoluzione del profilo di pressione.

In Figura 8 è mostrato un esempio di ugello e le relative grandezze in gioco. Alcune tra le grandezze indicate sulle sezioni di ingresso e uscita dell'ugello sono fondamentali per

caratterizzare la tipologia di efflusso del problema studiato e per questo è importante capirne il significato prima di procedere con la trattazione. In particolare:

- Pressione di rilascio  $p_0$  o  $p_{ril}$ : pressione a cui si trova il fluido al momento della fuoriuscita dal foro;
- Pressione ambiente p<sub>s</sub> o p<sub>amb</sub>: pressione a cui si trova l'ambiente in cui si riversa il fluido;
- Pressione di scarico  $p_2$ : pressione a cui si trova il fluido in corrispondenza della sezione di gola dell'ugello fittizio.



Figura 8 - Esempio di condotto convergente.

Un'ulteriore grandezza che caratterizza l'evoluzione dei fluidi attraverso i condotti è la pressione critica  $p^*$ , ovvero la massima pressione di scarico in grado di rendere sonica la velocità d'efflusso [29]. Il rapporto tra la pressione critica e la pressione di rilascio è conosciuto come rapporto critico R. Nell'ipotesi di trattare un gas ideale soggetto a sole trasformazioni isoentropiche, risulta valida la seguente uguaglianza:

$$\frac{p^*}{p_{ril}} = \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$
(2.4)

Si noti come il valore del rapporto critico dipenda unicamente dal coefficiente di dilatazione adiabatica  $\gamma$  e risulti quindi facilmente calcolabile. Nel caso in analisi il fluido coincide con il metano. In base alla teoria cinetica i gas pluriatomici (tre o più atomi) a temperature non troppo elevate hanno un numero di gradi di libertà *l* pari a sei, unico parametro sufficiente a stabilire il valore di  $\gamma$ :

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = \frac{l+2}{l} \tag{2.5}$$

Il coefficiente  $\gamma$  per il metano calcolato tramite la 2.5 è uguale a 1.3.

Dal punto di vista matematico, un efflusso si definisce critico quando la seguente disuguaglianza è verificata:

$$\frac{p_{amb}}{p_{ril}} \le \frac{p^*}{p_{ril}} \tag{2.6}$$

Dal punto di vista della fisica, le principali implicazioni riguardano la velocità e la pressione di scarico. Infatti, in condizioni critiche, la velocità sulla sezione d'uscita è sonica e la pressione di scarico è pari alla pressione critica:

$$\alpha = \sqrt{\gamma R T_2} ; \quad p_2 = p^* = R \cdot p_{ril}. \tag{2.7}$$

Il caso studio della presente trattazione utilizza un ugello non adattato. Ciò implica la presenza di un getto sottoespanso, in quanto il fluido eiettato è costretto a espandersi ulteriormente nell'ambiente circostante.

#### 2.1.1.2 Il getto sottoespanso

Un getto si definisce sottoespanso quando il fluido che fuoriesce da un foro o da un ugello si trova a una pressione maggiore della pressione ambiente. La condizione che determina se il getto è sottoespanso o meno, è la seguente:

$$\eta_0 \ge \frac{p_{ril}}{p^*} \tag{2.8}$$

A sinistra della disuguaglianza compare il grado di sottoespansione  $\eta_0$ , definito come il rapporto tra la pressione di rilascio e la pressione ambiente. Nella struttura di un getto sottoespanso si distinguono principalmente tre regioni [30]: nearfield zone, transition zone e farfield zone. La Nearfield Zone si compone a sua volta di due regioni, il *core* e il *mixing layer*, visibili in Figura 9. Il *core* è la regione in cui dominano gli effetti di comprimibilità e il fluido non subisce fenomeni di entrainment con l'aria circostante. Il *mixing layer*, al contrario, è fortemente influenzato dai fenomeni di turbolenza che assecondano il mescolamento del metano con l'aria. La Transition Zone è caratterizzata ovunque da fenomeni di entrainment in quanto, sia radialmente che longitudinalmente, le variazioni di pressione, temperatura e velocità sono minime. Infine, la Farfield Zone corrisponde alla temperatura evolvono longitudinalmente in maniera inversamente proporzionale rispetto alla distanza dalla sezione di uscita e radialmente secondo una distribuzione gaussiana centrata sull'asse z. In questa regione di flusso potrebbero ancora presentarsi fenomeni di comprimibilità se il Mach è maggiore di 0.3.



Figura 9 – schematizzazione di un getto sottoespanso [30].

Come si vedrà nel paragrafo 2.2.1, il modello SBAM permette la rappresentazione della Nearfield Zone di un getto, per questo motivo si è deciso di approfondire tale regione, trascurando la fenomenologia delle restanti due. In base al valore del grado di sottoespansione e quindi agli effetti che si generano nella Nearfield Zone, si distinguono tre tipologie di getti [30] [31]:

- moderatamente sottoespansi;
- altamente sottoespansi;
- estremamente sottoespansi.

I getti moderatamente sottoespansi, per fluidi con caratteristiche fisiche simili a quelle dell'aria, si presentano per  $2 \le \eta_0 \le 4$ . In Figura 10 è schematizzata la struttura di questo getto, comunemente chiamata configurazione a "diamante". Immediatamente dopo la sezione di uscita, si forma un ventaglio di espansione di Prandtl-Meyer. Quest'ultimo è costituito da onde di pressione che si propagano fino a incontrare una zona a pressione costante o superficie libera (zona 3) che le riflette verso l'asse sottoforma di onde di compressione. Ad una certa distanza dalla zona 3, le onde di compressione coalescono generando un urto obliquo (indicatore 4). L'urto obliquo, in corrispondenza dell'asse, si riflette verso la superficie libera dove nuovamente si generano i ventagli di espansione. La struttura si ripete finché gli effetti viscosi non diventano predominanti [30].



Figura 10 – schematizzazione di un getto moderatamente sottoespanso [30].

I getti altamente sottoespansi si osservano invece per  $4 - 5 < \eta_0 < 7$ . Diversamente da quanto detto per i getti moderatamente sottoespansi, in questo caso gli urti obliqui non interagiscono fra loro in corrispondenza dell'asse del getto e la struttura che si genera è molto più complessa. Per un dato angolo di deflessione  $\theta$  esiste un valore minimo del numero di Mach per cui può verificarsi il cosiddetto *straight attached incident shock*. Può succedere che, a valle di un'onda di shock, il numero di Mach diminuisca al di sotto del numero di Mach minimo associato a tale angolo. Siccome in questo caso la teoria degli urti obliqui non prevede una soluzione per la formazione di un *straight attached incident shock* [28], al suo posto si verifica il cosiddetto disco di Mach. La configurazione di questo fenomeno è indicata dalla zona 5 in Figura 11. In corrispondenza del disco di Mach si propaga un'onda d'urto riflessa. La zona 6 invece è detta punto triplo e corrisponde all'intersezione tra il disco di Mach, l'onda riflessa e l'onda d'urto di partenza.


Figura 11 - schematizzazione di un getto altamente sottoespanso [30].

Per valori del grado di sottoespansione  $\eta_0 > 7$  si è in presenza di un getto estremamente sottoespanso (Figura 12). In questo caso la struttura non è composta da più celle ricorrenti, al contrario il *core* è costituito da un'unica cella di shock. La configurazione è la stessa descritta per i getti altamente sottoespansi.



Figura 12 - schematizzazione di un getto estremamente sottoespanso [30].

I getti altamente ed estremamente sottoespansi risultano essere i più rilevanti ai fini della trattazione. Per simulare correttamente questa tipologia di getti è importante poter predire la localizzazione del disco di Mach, calcolata rispetto alla sezione di fuoriuscita del getto. L'argomento è stato ampiamente studiato negli anni, soprattutto in campo aeronautico. Numerosi studi scientifici si sono occupati di individuare la posizione in cui compare il disco di Mach ed è stato dimostrato che:

- Dipende strettamente dal grado di sottoespansione  $\eta_0$  [31] [32] [33]
- Dipende dal numero di Mach (se Mach aumenta all'uscita del foro, aumenta proporzionalmente anche la distanza del disco di Mach dal foro) [32];
- Non dipende dalla tipologia di fluido [33].

Per quanto riguarda la dipendenza dal grado di sottoespansione  $\eta_0$ , P. Franquet et al. [30] hanno condotto uno studio comparativo dei risultati più rilevanti in letteratura. Dalla sua analisi emerge che le correlazioni per localizzare il disco di Mach usate in ben nove studi diversi, convergono su un'unica curva, riportata in Figura 13.



Figura 13 – Posizione del disco di Mach secondo diversi studi [30].

In particolare, per la presente tesi, si decide di prendere in considerazione la correlazione proposta da S. Crist et Al. [31] in quanto, come si può notare in Figura 13, è stata ottenuta e validata per una vasta scala di valori  $\eta_0$ . La correlazione menzionata è la seguente:

$$L_{MD} = 0.645 \cdot d_{foro} \cdot \sqrt{\eta_0} \tag{2.9}$$

#### 2.1.1.3 Caratteristiche del flusso attorno a un cilindro

Si prosegue la presente trattazione specificando cosa accade quando un getto turbolento entra in contatto con uno ostacolo. Il getto di metano impatta su una tubazione, anch'essa contenente metano, presente nelle immediate vicinanze del rilascio. È innanzitutto necessario evidenziare la stretta dipendenza tra le caratteristiche del flusso e il numero di Reynolds. Dal punto di vista qualitativo, quanto più è alto il numero di Reynolds, tanto più si assottiglia la zona attorno all'ostacolo soggetta agli effetti viscosi, ovvero lo strato limite. In base a quanto riportato da [28], le tipologie di flusso attorno a un cilindro sono così classificate:

- a) Per bassi valori di Reynolds, 0 < Re < 4, la regione affetta dagli effetti viscosi si espande fino a diversi diametri dal cilindro, in ogni direzione. Le *streamlines* possono considerarsi simmetriche e il flusso non subisce nessun distaccamento, come è mostrato in Figura 14a:
- b) Per valori di Reynolds leggermente più alti, 4 < Re < 40, la regione viscosa si modifica: se a monte del cilindro si assottiglia, a valle diventa più rilevante. La conseguenza principale riguarda il distacco della vena fluida con conseguente formazione di due vortici stabili che ruotano in senso opposto (Figura 14b);
- c) Per  $40 < Re < 10^3$ , il flusso nella seconda metà del cilindro diventa instabile e i vortici non sono più stazionari. Essi si distaccano dal corpo in maniera alternata. La formazione, la crescita e poi il distaccamento di tali vortici si verifica periodicamente, dando origine alla scia di Von Karman a valle del cilindro (Figura 14c);
- d) Per valori di Reynolds  $\approx 10^5$  la scia di Von Karman diventa instabile distaccandosi in diverse scie. Per questo motivo, spesso ci si riferisce alla zona retrostante il cilindro chiamandola *wake region*. Il distacco dello strato limite laminare avviene a circa  $\theta = 80^\circ$  dal punto di stagnazione, come illustrato in Figura 14d;
- e) Per valori di Reynolds  $3 \cdot 10^5 < Re < 3 \cdot 10^6$  lo strato limite laminare si distacca. In corrispondenza dello scollamento, il flusso fluido subisce un'inversione, inducendo turbolenza ed ispessimento dello strato limite. Questo riprende aderenza sul retro del cilindro per poi subire un ulteriore distaccamento a  $\theta = 120^\circ$  (Figura 14e);
- f) Per Reynolds  $Re > 3 \cdot 10^6$  lo strato limite subisce dapprima una transizione a turbolento e in un secondo momento si distacca dal cilindro, circa a  $\theta = 120^\circ$ .



Figura 14 – schematizzazione dei vari flussi attorno a un cilindro [28].

La distribuzione di pressione attorno ad un cilindro è illustrata per diversi regimi di velocità in Figura 15. In assenza di effetti viscosi, la pressione a cui è soggetta una particella in moto dal bordo di attacco ( $\theta = 0^{\circ}$ ) al bordo d'uscita del cilindro ( $\theta = 180^{\circ}$ ) varia in maniera sinusoidale. La particella, muovendosi lungo il cilindro, non subisce nessuna perdita di energia. Ciò che avviene è una conversione di energia: in corrispondenza del punto di stagnazione la velocità è nulla e la pressione è massima. A  $\theta = 90^{\circ}$  la situazione è invertita. Nel caso reale esiste uno strato limite viscoso a contatto con il cilindro che, in presenza di un gradiente avverso di pressione separa dalla superficie. La distribuzione di pressione è influenzata da questo fenomeno, che ne modifica l'andamento. Dopo aver toccato un minimo il  $C_p$  rimane costante in quanto le regioni in cui avviene la separazione della vena fluida presentano un valore di pressione pressoché costante e pari alla pressione *freestream*. Questo fenomeno si può osservare dagli andamenti in linea tratteggiata e continua. Essi provengono da due misure sperimentali di correnti con Reynolds differente.



Figura 15 – variazione del  $C_P$  attorno a un cilindro [28].

# 2.2 Modelli per i rilasci gassosi

Le metodologie utilizzate nel settore Oil & Gas per valutare le conseguenze di un evento incidentale sono basate su modelli semi-empirici oppure su modelli CFD. Al giorno d'oggi i modelli più utilizzati appartengono alla prima categoria, per via della loro semplice e rapida implementazione resa possibile da forti approssimazioni geometriche e fisiche. Il grande svantaggio di questi modelli risiede nella sovrastima delle conseguenze e quindi in una spesa eccessiva di materiali e ingenti perdite economiche. La modellazione CFD invece, se da un lato è in grado di simulare fenomeni e geometrie complesse, dall'altro richiede costi computazionali così elevati da non essere compatibile con le tempistiche di *risk assessment* durante le fasi di progettazione e costruzione di una piattaforma. Solitamente dunque, il compromesso migliore per utilizzare le analisi CFD in questo contesto consiste nel simulare solo un numero ridotto di scenari. Chiaramente il rischio è che questo numero sia nettamente inferiore al reale numero di scenari critici selezionati durante la QRA.

Il presente lavoro di tesi sfrutta una soluzione ibrida (Uggenti et al, 2016) che mira a interporsi fra i modelli empirici e CFD, scomponendo il fenomeno dei rilasci gassosi in due fasi distinte o *Two Steps* [34]: rilascio e dispersione. La necessità di distinguere i due eventi nasce dalla diversità dei fenomeni fisici che caratterizzano ciascuna fase. Infatti, in base a quanto è stato detto nel Capitolo 2, il rilascio è dominato da effetti di comprimibilità e da velocità supersoniche. Le velocità di efflusso del getto sono dell'ordine delle centinaia di metri/s e quindi il meccanismo di trasporto predominante è costituito dalle forze inerziali del getto. La dispersione invece, vede un fluido incomprimibile propagarsi all'interno della piattaforma. Il regime di velocità è subsonico, con velocità dell'ordine dei m/s e il campo di moto è dominato da effetti di galleggiamento.

La fase di rilascio è modellata all'interno di un dominio cubico chiamato *Source Box*. A simulazione terminata, dalle facce di *output* del dominio è possibile estrapolare i profili di velocità e di concentrazione del metano. Tali dati, costituiscono gli *input* per le successive simulazioni di dispersione, modellate all'interno del dominio "piattaforma". Questi output sono composti dai profili di velocità e di frazione in massa di CH<sub>4</sub>. La scelta di non fornire valori medi o profili approssimati delle grandezze citate, risiede nel voler evitare di sottostimare la quantità di sostanza rilasciata [21] e il volume della piattaforma interessata dalla nube di infiammabile. In Figura 16 è raffigurato il processo di estrapolazione e acquisizione dei dati.



Figura 16 - Diagramma di flusso dell'approccio Two-Steps.

La soluzione ibrida consente di ridurre l'onere computazionale pur mantenendo una accuratezza accettabile e permette la simulazione di un numero maggiore di scenari incidentali rispetto all'approccio *One-Step*. Quest'ultimo simula l'intero fenomeno incidentale all'interno dello stesso dominio. Gli svantaggi nell'utilizzo di tale modello risiedono in potenza e tempi computazionali molto onerosi. Un'analisi comparativa dei due modelli può essere approfondita nel lavoro di A. Moscatello [21].

Una ulteriore potenzialità dell'utilizzo del modello SBAM risiede nella possibilità di creare un catalogo di SB che racchiuda diversi scenari di rilascio al suo interno. Il catalogo potrà essere consultato da un analista del rischio che, in base alle caratteristiche ambientali e incidentali dello specifico case study, sarà in grado di selezionare la SB di interesse e di utilizzare i profili per simulare la fase di dispersione. In questo modo non si è più legati alla necessità di simulare con mezzi di CFD la fase di rilascio, la quale presenta alti oneri computazionali e problemi legati alla convergenza del modello. La realizzazione della libreria di SB pertanto, permetterebbe di simulare una volta per tutte le SB, che costituiscono una sorta di black box per i modelli di dispersione. L'idea di intraprendere tale strada è dovuta alla natura della SB. Essa è uno strumento "pronto all'uso" [34] in quanto tutte le sue principali caratteristiche sono note: il dominio geometrico, la matematica del fenomeno e le variabili che lo influenzano. Nel paragrafo che segue si mira a caratterizzare la SB, sottolineando a che grandezze è soggetta e i range di variabilità delle variabili. Grazie a questa analisi è possibile effettuare una stima delle dimensioni che dovrebbe avere il catalogo per racchiudere al suo interno le casistiche più rappresentative delle fasi di rilascio.

### 2.2.1 Dominio fase di rilascio: la Source Box

La source box è il dominio ridotto in cui evolve la fase di rilascio vera e propria. L'idea consiste nel creare un catalogo di *Source Box*, in modo che nella fase di valutazione dei rischi, l'analista possa prelevare i dati dalle source box che meglio rappresentano lo scenario incidentale d'interesse, senza dover eseguire nuovamente l'analisi CFD del rilascio. Questo approccio è molto innovativo e consente di ridurre notevolmente i tempi computazionali, consentendo all'analista di simulare un numero importante di simulazioni di rilascio/dispersione all'interno dello stesso layout di piattaforma.

La *Source Box* ha una geometria cubica, le cui dimensioni vengono valutate in modo che all'interno di esso si esauriscano gli effetti di comprimibilità a cui è soggetto il fluido e che il regime di velocità si uniformi a quello del vento. Secondo l'ipotesi di Stephens [35] la lunghezza per cui si verifica quanto specificato, è pari a dieci volte la distanza tra la formazione del disco di Mach e la sorgente di rilascio, ovvero:

$$L_{SB} = 10 \cdot L_{MD} = 10 \cdot 0.645 \cdot d_{foro} \cdot \sqrt{\eta_0}$$
(2.10)

Essendo le dimensioni della Source Box proporzionali al diametro del foro di rottura e alla pressione di rilascio, esse crescono all'aumentare delle grandezze citate. L'utilizzo della 2.10 è stato validato per getti che non impattano su alcun ostacolo. Quindi, quando applicata ad un contesto come quello dell'Oil & Gas risulta maggiormente valida in quanto le piattaforme costituiscono ambienti congestionati in cui si concentrano numerosi ostacoli, i quali rallentano i regimi di velocità dei getti.

Il modello di *Source Box* trova applicazione in rilasci gassosi provenienti da vari componenti (serbatoi, valvole, flange, etc). Nel caso in analisi, il foro di rottura si trova su una pipeline di metano e si è deciso di includere un ostacolo cilindrico all'interno della *Source Box* in modo da rendere la simulazione più realistica.

Le variabili che più influenzano il rilascio nella *Source Box* (da qui in poi SB) sono elencate di seguito:

- Pressione di rilascio;
- Dimension ratio;
- Diametro del foro di rottura;
- Direzione del getto.

La pressione di rilascio è la variabile più impattante, principalmente perché da essa dipendono le caratteristiche del getto e le dimensioni della SB stessa. In aggiunta, la pressione con cui fuoriesce il getto di metano dalla tubazione stabilisce anche il regime di velocità di quest'ultimo. Un problema legato alla pressione di rilascio è sicuramente il range da utilizzare nel modello. Realisticamente parlando, su una piattaforma la pressione di stoccaggio degli idrocarburi può raggiungere i 100 bar. Tuttavia, abbinando alte pressioni con fori di rilascio ampi si rischia di ottenere dimensioni della SB eccessive rispetto alle dimensioni della piattaforma. Se le dimensioni della SB diventassero comparabili alle

dimensioni della piattaforma, il modello *Two-Steps* perderebbe la sua efficacia: ci si troverebbe infatti a dover modellare la fase di dispersione al di fuori del dominio della piattaforma ed indagare i fenomeni in mare aperto non è tra gli obbiettivi della tesi. In questi casi bisognerà utilizzare delle dimensioni prefissate che non siano eccessivamente grandi.

Esistono poi due parametri numerici da tenere in considerazione nel modellare la SB [34]: il diametro dell'ostacolo e la distanza di quest'ultimo dalla sezione di gola dell'ugello. Al fine di ridurre il numero delle simulazioni da inserire nel catalogo delle SB e di rendere più efficace la selezione del *case study* d'interesse durante l'utilizzo, questi parametri non saranno valutati separatamente in quanto esistono troppe combinazioni dei due e questo porterebbe a una inefficienza del catalogo di SB, ostacolando la scelta di quest'ultima da parte dell'analista di rischio. Per facilitare la scelta della corretta SB dunque, gli autori di [34] hanno pensato di classificare le *Source Box* in base alle seguenti considerazioni. Si immagini il caso in cui un getto con diametro costante  $d_{jet}$  investe un ostacolo di diametro  $d_{cvlinder}$ :

- Se  $d_{iet} > d_{cylinder}$  il getto sorpassa l'ostacolo mostrando un moto turbolento;
- Se d<sub>jet</sub> < d<sub>cylinder</sub> il getto è bloccato dalle dimensioni dell'ostacolo, che non ne permette la propagazione lungo l'asse, bensì in direzione normale;
- Se d<sub>jet</sub> ≈ d<sub>cylinder</sub> il getto può sviluppare diversi comportamenti in funzione del solo tipo di ostacolo. Nel caso del cilindro il flusso perde quantità di moto ma continua comunque ad aggirare l'ostacolo per via dell'effetto Coanda, il quale prevede che le streamlines di un flusso supersonico si muovano lungo una superficie curva senza distaccarsene.

Le precedenti considerazioni sono state sintetizzate tramite l'introduzione del parametro *dimension ratio* A, definito come segue nel caso del cilindro:

$$A_{cyl} = \frac{d_{jet}}{d_{cylinder}}$$
(2.11)

La direzione del getto influenza fortemente la distribuzione della nube infiammabile durante la fase di dispersione. Esistono getti orizzontali, verticali e direzionati secondo le infinite diagonali tra la direzione verticale e orizzontale (ibid.). I getti più studiati in letteratura si sviluppano in orizzontale e in questa tesi si farà altrettanto. Per approfondire come una variazione delle grandezze citate influenzi i risultati all'interno della SB si faccia riferimento al lavoro di Ledda [20].

## 2.2.2 Dominio della dispersione: piattaforma petrolifera

Il layout della piattaforma di riferimento utilizzato per le simulazioni appartiene a un design esistente. Esso è rappresentativo del maggior numero di strutture presenti in Italia e ha le seguenti caratteristiche: struttura emersa a tre *decks* sostenuta da un *jacket*. Il deck centrale è atto alla produzione di idrocarburi e presenta una pavimentazione solida del tipo *plated*. Questa ipotesi, come sottolineato in [10], è prettamente conservativa perché il gas naturale rilasciato non ha la possibilità di disperdersi oltre il piano di produzione, al contrario si accumula al di sotto della superficie superiore a causa della differenza di densità di metano e aria. Il piano d'interesse per la trattazione è il deck di produzione, sul quale sono generalmente presenti componenti che processano idrocarburi in pressione, come tubazioni, separatori e compressori. Le tipiche forme degli ostacoli contro cui può impattare il getto quindi, sono cilindriche (verticali od orizzontali) o piane. In Figura 17 è illustrato il layout della piattaforma di riferimento e la localizzazione della SB.



Figura 17 – layout della piattaforma di riferimento.

Per quanto riguarda la localizzazione geografica della piattaforma è stata scelta una regione a largo delle stazioni meteorologiche ubicate a Ravenna Punta Marina e Ancona Boa. Queste informazioni sono fondamentali per modellizzare al meglio la geometria del dominio e le condizioni al contorno da imporre nel solver fluidodinamico, ovvero quali profili di vento adoperare.

# Capitolo 3 Metamodellazione

Il Capitolo 3 propone un approfondimento teorico del modello P-NIROM scelto per popolare la libreria di *Source Box*. In particolare, il capitolo si focalizza sul metodo di campionamento adoperato per addestrare il meta-modello e definisce i *case study* da simulare sia per l'addestramento (o training-set) che per la validazione (o validation-set) del metamodello.

# 3.1 Cenni di metamodellazione

All'interno del Capitolo 1 si è sottolineato come l'onere computazionale delle simulazioni numeriche, sia in termini di memoria occupata che di tempo di calcolo, talvolta sia così dispendioso da far nascere l'esigenza di sviluppare modelli surrogati. Alla base di questi meta-modelli si trovano i modelli di ordine ridotto ROMs (*Reduced Order Models*). Generalmente con il termine ROMs ci si riferisce a tutti quei modelli che calcolano una soluzione approssimata del problema tramite una combinazione lineare delle basi. Nei modelli sviluppati per uso fluidodinamico i coefficienti moltiplicativi delle basi sono trovati minimizzando l'errore o tramite la proiezione di Galerkin. La costruzione delle basi ridotte si basa sulle soluzioni delle PDE iniziali o *snapshots*.

La maggior parte dei meta-modelli esistenti al giorno d'oggi sono di tipo intrusivo. Essi dipendono fortemente dalle PDEs di partenza e dagli schemi numerici usati dai modelli ad alta affidabilità (*high-fidelity*). In aggiunta presentano delle problematiche legate alle non-linearità del problema e alle instabilità del codice. Per tali ragioni sono stati sviluppati recentemente dei modelli non intrusivi.

Nella presente trattazione si testano le capacità predittive di un ROM appartenente alla categoria P-NIROM (*Parametrized Non-Intrusive Reduced Order Model*) e quindi di carattere non intrusivo. Il modello adoperato nella presente analisi per popolare la libreria di SB si basa sugli algoritmi creati da D. Xiao et al. [36] ed è stato sviluppato da N. Abrate, S. Dulla, N. Pedroni. Gli autori hanno usato il meta-modello per studiare la stabilità del core di un reattore nucleare con lo scopo di ridurre il tempo computazionale [27]. Questa tipologia di ROM permette di suddividere il calcolo in una parte *off-line* dove il meta-modello viene addestrato fornendogli in input dei set di simulazioni CFD, e in una parte on-line, dove è possibile testare le capacità del meta-modello inserendo come input punti di non addestramento. In aggiunta, il meta-modello ha il grande vantaggio di poter essere

definito come adattivo. Il numero dei punti di addestramento infatti, può essere aumentato di volta in volta in base all'accuratezza richiesta dal particolare problema.

Nella applicazione di N. Abrate et al. i punti di addestramento sono selezionati tramite l'utilizzo della griglia sparsa di Smolyak e il metodo di interpolazione implementato è una rete di RBF (*radial basis functions*). Nel paragrafo che segue sono approfondite le basi matematiche su cui si fonda il meta-modello utilizzato.

## 3.2 Processo di riduzione del modello CFD

Nel presente contesto, lo scopo della discretizzazione è quello di trasformare set di equazioni differenziali alle derivate parziali in set di equazioni differenziali ordinarie. A tal fine è opportuno suddividere il problema in due contributi: *state variable vector* e *basis functions*. Essi costituiscono, rispettivamente, l'equivalente delle *generalized coordinates* e delle *shape functions* nella discretizzazione del più studiato problema dinamico [37]. La trattazione, dunque, si concentra ora sul calcolo di questi due contributi.

Un sistema non lineare spazio-tempo dipendente, opportunamente formulato attraverso un sistema di PDEs, può essere genericamente espresso con la seguente notazione:

$$F(\boldsymbol{u}(\boldsymbol{x},t,\boldsymbol{\mu}),\boldsymbol{x},t,\boldsymbol{\mu}) = s(\boldsymbol{x},t,\boldsymbol{\mu})$$
(3.1)

Dove,  $u(x, t, \mu)$  rappresenta lo *state variable vector* e nel caso in esame può comprendere le componenti del vettore delle velocità, le componenti del gradiente di pressione e di temperatura calcolate negli N nodi in cui è discretizzato il problema. Questo vettore, appartenente all'insieme dei numeri reali, ha dimensione DxN, dove D è il numero di scalari identificati per ciascun nodo considerato ed N è appunto il numero totale dei nodi del dominio computazionale del metamodello. Il termine x invece rappresenta il vettore delle coordinate cartesiane, s il termine sorgente, t il tempo e  $\mu$  è il vettore dei parametri, avente stessa dimensione dello spazio dei parametri.

Come evidenziato precedentemente, nella riduzione dell'ordine di un modello, il vettore degli stati (i.e. *state variable vector*) può essere espanso come combinazione lineare tra il contributo delle basis functions e delle coordinate generalizzate (i.e *reduced state variable vectors*). Il risultato è l'aver separato la dipendenza temporale da quella spaziale: il primo termine dipende unicamente dalle coordinate spaziali e dallo spazio dei parametri, mentre il secondo, dipendente dal tempo e chiamato coordinate generalizzate, rappresenta il vettore delle incognite. I contributi possono essere espressi nella seguente forma:

$$\boldsymbol{u}(\boldsymbol{x},t,\boldsymbol{\mu}) = \boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{u}^{\boldsymbol{r}} \tag{3.2}$$

Dove  $u^r(t,\mu)$  rappresenta il *reduced state variable vector*, r indica l'ordine di riduzione associato al ROM e  $\Phi(x,\mu)$  rappresenta le *basis functions*.

Servendosi del metodo POD (*Proper Orthogonal Decomposition*), le basi sono calcolate in funzione dei valori ottimi contenuti negli snapshots, campionati ad intervalli regolari:

$$\Phi_m(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\mu}) = \sum_{i=1}^{N_t} \boldsymbol{u}(\boldsymbol{x}, t_i, \boldsymbol{\mu}) \Gamma_{m,i}$$
(3.3)

Essendo una base di uno spazio vettoriale, dev'essere opportunamente normalizzata, dunque essa è vincolata alla seguente condizione:

$$\sum_{m=1}^{K} \|\langle \Phi_m | \Phi_m \rangle\|_L^2 = 1$$
(3.4)

Dove, *m* rappresenta il numero delle basi selezionate e  $\Gamma$  è ottenuto usando il metodo *singular value decomposition* (SVD). Il passaggio finale consiste nella proiezione ortogonale del sistema nello spazio delle coordinate ridotte, così da troncare la grandezza del sistema all'ordine scelto. La proiezione è effettuata come segue:

$$\Phi^T F(\boldsymbol{u}(\boldsymbol{x}, t, \boldsymbol{\mu}), \boldsymbol{x}, t, \boldsymbol{\mu}) = \Phi^T s(\boldsymbol{x}, t, \boldsymbol{\mu})$$
(3.5)

Si ottiene così il parametrized reduced order model nella seguente forma:

$$F^{r}(\boldsymbol{u}^{r}(\boldsymbol{x},t,\boldsymbol{\mu}),\boldsymbol{x},t,\boldsymbol{\mu}) = s^{r}(\boldsymbol{x},t,\boldsymbol{\mu})$$
(3.6)

#### 3.2.1 Calcolo delle basi dello spazio dei parametri

In questa sezione è descritta la metodologia su cui si fonda il calcolo delle *basis functions* tramite la griglia sparsa di Smolyak e l'interpolazione mediante RBF. L'algoritmo di Smolyak ha l'obbiettivo di definire set di punti ottimali per integrare funzioni in uno spazio a più dimensioni e sarà utile per trovare i punti appartenenti al training set del metamodello. Gli snapshot della soluzione sono calcolati dal modello high fidelity. Le corrispondenti basi POD sono calcolate di conseguenza usando la metodologia SVD/POD. Infine, le soluzioni vengono determinate per ogni valore dei parametri  $\mu$  usando una rete di RBF centrate sui punti di addestramento, in grado di interpolare i punti non addestrati.

#### 3.2.1.1 Calcolo dei parametri d'interpolazione tramite l'algoritmo di Smolyak

La griglia di Smolyak è un metodo numerico per il calcolo interpolante od integrante di funzioni. Il concetto fondamentale della griglia sparsa di Smolyak è che seleziona un numero di nodi ridotto in base alla loro potenziale importanza, rendendo il calcolo più

agevole. In questo specifico caso, nelle simulazioni del metamodello è utilizzato solo un piccolo numero di nodi rispetto alla griglia di calcolo del modello *high fidelity*. Ovviamente questa operazione comporta un grado di approssimazione. Il processo di campionamento dei nodi e di interpolazione dei parametri della griglia di Smolyak può essere riassunto nei seguenti passaggi. La quadratura 1-dimensionale contenente  $N_l$  parametri è:

$$Q_l^1 f = \sum_{i=1}^{N_l} f(\boldsymbol{\mu}_l^i) \eta_l^i$$
(3.7)

Dove, la *l* identifica il grado di approssimazione della griglia sparsa e *f* è la funzione di quadratura definita nell'intervallo [0 1] che deve essere opportunamente approssimata. Il termine  $\eta$  rappresenta la *weight function* corrispondente al parametro  $\mu_l^i$  dove i è l'i-esimo punto della griglia. Per poter costruire la griglia sparsa, dev'essere introdotto un funzionale multi-indice, nella seguente forma:

$$I = \sum_{i=1}^{P} l_i \tag{3.8}$$

Questo funzionale multi-indice determina il numero di punti selezionati dalla griglia di calcolo originaria. L'espressione della griglia di Smolyak d-dimensionale risulta essere:

$$Q_l^P f = \sum_{|l| < l+P-1}^P \left( \Delta_{l1}^1 \otimes \dots \otimes \Delta_{lP}^P \right) f$$
(3.9)

Dove  $\Delta_{l1}^1$  rappresenta una differenza di quadratura  $\Delta_{l1}^1 = (Q_l^1 - Q_{l-1})f$  con condizione iniziale  $Q_0^1 f = 0$ . La griglia sparsa di Smolyak soddisfa la seguente condizione:

$$P \le i_1 + i_2 + \dots + i_P \le P + l \tag{3.10}$$

Dove *i* specifica la dimensione dell'approssimazione. In Figura 18 è possibile apprezzare il potenziale di riduzione dei nodi della griglia di Smolyak. Si noti come questo algoritmo sia molto più efficace per spazi dei parametri con dimensione maggiore a 1.



Figura 18 - griglia di Smolyak 1-D (sopra) e 2-D (sotto) [36].

#### **3.2.1.2 Interpolazione delle basis functions e degli snapshots**

Campionando attraverso la griglia di Smolyak le soluzioni ottenute dal modello *high fidelity*, per ogni parametro  $\mu$ , si ottengono una serie di snapshots  $u(\cdot, \mu_p)$  e di basis functions  $\Phi(\cdot, \mu_p)$  dove P è il numero totale dei parametri interpolanti. Per ogni parametro  $\mu$ , il corrispondente snapshot può essere ottenuto attraverso una funzione interpolante *I* tale che:

$$u(\cdot, \cdot, \mu) = I(u(\cdot, \cdot, \mu_1), \dots, (\cdot, \cdot, \mu_P))$$
(3.11)

Il metodo d'interpolazione selezionato è il *Radial Basis Function* (da qui in poi RBF). L'RBF è una funzione interpolante il cui valore dipende unicamente dalla distanza tra il punto d'interpolazione stesso e l'origine. Questa funzione usa i parametri interpolanti ottenuti dalla griglia di Smolyak, nel seguente modo:

$$I(\mu) = \sum_{p=1}^{P} w_p \Phi(\|\mu - \mu_P\|)$$
(3.12)

Dove la funzione interpolante I è rappresentata come somma delle P (numero dei parametri di training set) basi radiali, ciascuna delle quali calcolata rispetto ad un centro  $\mu_P$  ed avente peso  $w_P$ . Esistono diverse categorie di RBF a disposizione.

Il meta-modello utilizzato in questa trattazione è costruito in modo da sfruttare sia le RBF **gaussiane** che le **quadratiche inverse**, in modo da testare quale rete di funzioni sia in grado di approssimare meglio la soluzione. La formulazione matematica delle funzioni gaussiane e delle quadratiche inverse è la seguente:

$$\phi(\mathbf{r}) = e^{-\frac{r^2}{\sigma}} \tag{3.13}$$

$$\phi(\mathbf{r}) = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{r^2}{\sigma}}} \tag{3.14}$$

Esse dipendono da una variabile r e un parametro "libero":

- $r = \mu \mu_P$  è la distanza fra il punto di addestramento e il punto di non addestramento;
- $\sigma$  o *smooth factor* è un parametro di forma responsabile dell'ampiezza assunta dalla funzione.

Il parametro di forma è un parametro "libero", nel senso che non ha un valore prestabilito, pertanto può assumere molteplici valori. In genere si sfrutta questo grado di libertà per ottimizzare le prestazioni del meta-modello. Nella pratica si svolge un'analisi di sensibilità (o tuning) atta a verificare quale sia il valore di smooth factor per cui il meta-modello riproduce al meglio i dati. Il valore di  $\sigma$  ottenuto si sfrutta durante la fase di validazione. Per quanto sia "libera" la scelta di tale parametro, bisogna prestare attenzione ai seguenti aspetti. In generale quanto più si aumenta questo parametro, tanto più le RBF centrate sui punti di addestramento si uniformano l'una con l'altra, fino a formare un'unica superficie. La forma più larga dunque, le porterebbe a estendersi lungo lo spazio dei parametri in maniera molto più efficiente. Questo aspetto, che in prima battuta potrebbe sembrare la condizione ottimale, è controbilanciato dall'errore di condizionamento della matrice. Da un punto di vista numerico infatti, quanto più è alto il valore di  $\sigma$ , tanto più la matrice si avvicina alla condizione di singolarità. Il risultato in questo caso consisterebbe nell'avere una rete di interpolazione la cui efficienza è vanificata da un errore numerico elevato. Bisogna quindi ricorrere a un compromesso: scegliere un valore di  $\sigma$  abbastanza grande da avere una buona interpolazione, ma piccolo a sufficienza per un numero di condizionamento limitato.

Il meta-modello utilizzato nella trattazione si prepone, durante la fase di tuning, di scegliere un parametro di forma in grado di minimizzare:

- L'errore sui punti di addestramento;
- L'errore sui punti di validazione.

Nel primo caso ci si vuole accertare che il meta-modello sia in grado di riprodurre almeno i punti con cui è stato addestrato. Idealmente questo errore dovrebbe essere pari a 0, tuttavia la realtà si discosta da tale valore. Gli errori sui set di addestramento e validazione sono valutati tramite l'RMSE (*Root Mean Square Error*), ovvero lo scarto quadratico medio. Il valore di questo indicatore è calcolato tramite l'equazione 3.14:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{T} (\hat{y_t} - y_t)^2}{T}}$$
(3.14)

Dove, T è il numero totale degli errori calcolati, pertanto pari al numero di simulazioni di validazione. La dicitura  $\hat{y_t}$  indica l'errore medio, mentre  $y_t$  l'errore del t-esimo caso di validazione. L'RMSE è un indicatore di errore sensibile ai punti lontani dalla media, cioè costituisce un modo robusto per tenere in considerazione anche gli errori lontani dall'errore medio. Per questo motivo la scelta di come stimare l'errore è ricaduta sull'RMSE.

In Figura 19 è illustrato l'andamento dell'errore sui punti di addestramento in funzione del parametro di forma per le due reti di RBF.



Figura 19 - RMSE calcolato sui punti di addestramento in funzione del parametro di forma.

Come era possibile aspettarsi, per via dell'errore di condizionamento, l'errore sui punti di addestramento aumenta al crescere del parametro di forma. Per entrambe le reti di RBF l'errore è comunque di ordini di grandezza inferiore all'unità. Questo è sicuramente un buon indicatore del fatto che il meta-modello sia stato costruito e addestrato bene.

L'errore sui punti di validazione invece, è molto utile per capire effettivamente quale rete di RBF sia in grado di interpolare meglio lo spazio dei parametri. Sui punti di validazione infatti, ci si aspetta un errore di ordini di grandezza superiori rispetto all'errore sui punti di addestramento. Per calcolarlo, a ogni parametro di forma si associa un modello costituito da un set di RBF in grado di riprodurre le simulazioni di validazione. Così facendo si confronta in maniera preliminare l'errore tra CFD e ROM. Questa analisi permette nella successiva fase di validazione di impostare il  $\sigma$  che minimizza entrambi gli errori. L'andamento dell'errore sui punti di validazione in funzione del parametro di forma per le due reti di RBF è illustrato in Figura 20. Anche in questo caso l'errore aumenta al crescere del valore del parametro di forma, coerentemente con le osservazioni menzionate precedentemente.



Figura 20 - RMSE calcolato sui punti di validazione in funzione del parametro di forma.

Al termine della fase di analisi di sensibilità si può concludere che il  $\sigma$  ottimale selezionato dal meta-modello di Abrate et Al. [27] è pari a  $\sigma_{opt} = 3.17266$  ed è stato individuato per la rete di RBF appartenenti alla categoria delle funzioni inverse quadratiche.

## 3.3 Definizione dei set di addestramento e validazione

Nel paragrafo precedente si è parlato di come si interfacciano la griglia di Smolyak e il meta-modello. Quest'ultimo interpola i punti non addestrati tramite una rete di RBF centrate sui punti di addestramento. Chiaramente la scelta di come effettuare il campionamento dei punti di training influisce molto sulla qualità dell'addestramento. Se per esempio si decidesse di campionare i punti uniformemente nell'intervallo di ciascuna variabile, i set di training sarebbero costituiti da  $P^N$  punti. Supponendo di avere quattro punti per variabile e tre variabili, le funzioni dovrebbero essere valutate in  $4^3 = 64$  punti. Smolyak permette di definire una griglia che anziché crescere esponenzialmente ( $P^N$ ) cresce polinomialmente. Per questo motivo il set di training utilizzato in questa trattazione si basa sulla griglia di Smolyak. Lo svantaggio dell'algoritmo risiede nella sua bassa efficienza quando applicato a uno spazio dei parametri a una sola dimensione (nel nostro caso infatti, l'unico parametro campionato è la pressione di rilascio).

In un lavoro di tesi svolto parallelamente a questo [38] il metodo utilizzato per selezionare i punti di addestramento è il campionamento uniforme. Lo scopo risiede nel comprendere quale dei due sistemi sia migliore per uno spazio dei parametri a una sola dimensione.

	Livello 2			10 bar
Livello 1		lo 2 Livello 3		45 bar
				80 bar
				20,478 bar
				70,053 bar
			Livello 4	12,667 bar
				32,2084 bar
				58,579 bar
				77, 822 bar
				79,744 bar
				74,444 bar
				64,696 bar
				51,971 bar
				38,973 bar
				25,965 bar
				15,995 bar
				10,601 bar

I punti selezionati da Smolyak sono riassunti in Tabella 2.

Tabella 2 - punti di addestramento dell'i-esimo livello.

Come si può notare dalla Tabella precedente, una proprietà della griglia di Smolyak è quella di generare insiemi di punti innestati su più livelli. Questo si traduce nel fatto che i punti appartenenti al livello 4 includono tutti quelli dei livelli precedenti più un certo numero di punti d'infittimento. Questa proprietà rende il metamodello adattivo: si sceglie un livello di

infittimento e se a valle della fase di validazione esso dovesse fornire approssimazioni inaccurate allora si potrà implementare il livello di addestramento successivo senza dover cominciare dall'inizio. Il livello 1 è formato da soli tre punti, ovvero la pressione minima (10 bar), la pressione massima (80 bar) e una pressione intermedia (45 bar). In Figura 21 è illustrata la distribuzione dei punti con i vari livelli di approssimazione: il livello 4 include i livelli 1, 2 e 3, ma i punti sono sovrapposti e non sono visibili nel grafico.



Figura 21 – Livelli di approssimazione dello spazio dei parametri.

Per quanto riguarda la fase di validazione del metamodello, si è scelto di utilizzare un set di simulazioni con una pressione di rilascio prelevata uniformemente tra 10 e 80 bar (escludendo gli estremi), con un passo di 10 bar. Per una più accurata descrizione dei casi da analizzare si rimanda al paragrafo 4.1.

# Capitolo 4 Simulazioni CFD

Il Capitolo 4 fornisce il quadro generale di quelli che sono i punti di partenza, gli obbiettivi delle analisi di rilascio e gli strumenti utilizzati per eseguirle. In particolare, si illustra brevemente come è avvenuta la modellazione della geometria, la generazione della griglia di calcolo e l'impostazione dell'analisi fluidodinamica. Il focus del quarto capitolo ricade sull'elaborazione dei risultati ottenuti e sulle criticità riscontrate durante le analisi.

# 4.1 Panoramica del problema

Al fine di popolare la libreria delle SB tramite l'ausilio del meta-modello, bisogna fornire a quest'ultimo i set di addestramento e di validazione. È fondamentale quindi, generare un numero sufficiente di scenari di rilascio incidentale da cui estrapolare profili di velocità e di frazione massica di metano. Fornendo tali dati al meta-modello è possibile "addestrarlo": affinché un metamodello possa produrre dei risultati attendibili, necessita di numerosi esempi a cui attingere. Chiaramente più sono le casistiche incluse nel set di addestramento, più il risultato è affidabile.

Creare diversi scenari incidentali significa variare alcune tra le grandezze che più influiscono sul fenomeno di rilascio. Il lavoro svolto sul fronte della CFD si articola nella modellazione di 15 diversi scenari incidentali, di cui:

- 9 appartenenti al *training set*;
- 6 appartenenti al *validation set*.

Il primo problema riscontrato riguarda il criterio con cui generare i set di validazione. Per comparare scenari diversi, il metamodello necessita come input esattamente la stessa geometria, ma dal Capitolo 2 è noto che le dimensioni della SB sono soggette alla variazione di grandezze come pressione di rilascio e diametro del foro. In aggiunta, le griglie di calcolo sono diverse da simulazione a simulazione e quindi la discretizzazione del dominio non è esattamente la stessa. La soluzione risiede nel generare due set principali. Ogni set è caratterizzato da un determinato diametro di rilascio, mentre le pressioni sono lasciate variare entro il range indicato in Tabella 3, con un passo di 10 bar. La lunghezza della SB è calcolata in funzione della pressione di rilascio più alta (80 bar) e per ogni set viene mantenuta costante ai fini di fornire la stessa geometria al metamodello. In questo modo aumenta l'onere computazionale, ma è possibile inglobare le casistiche a pressioni più basse. I *validation set* e i relativi parametri sono definiti in Tabella 3.

Set	L <sub>SB</sub> [m]	D <sub>foro</sub> [m]	P <sub>ril</sub> [bar]	D <sub>cil</sub> [m]	l [m]
1)	0,6	0,01	$10 \div 80$	0,2	0,3
2)	1,7	0,03	10 ÷ 80	0,2	0,3

Tabella 3 - caratterizzazione dei validation set.

Il range entro cui varia la pressione di rilascio è stato scelto in modo da poter riprodurre un numero di casistiche elevato, in quanto su un deck di produzione solitamente si trattano fluidi la cui pressione di stoccaggio varia notevolmente.

Il diametro dei fori di rilascio invece, è stato scelto consultando il documento "Process Release Frequencies" [39] redatto dalla IOGP (*International Association of Oil & Gas Producers*). Il documento citato è una scheda che raccoglie i dati relativi alle frequenze con cui si verificano determinati eventi di rilascio incidentale nel campo dell'Oil & Gas. Le frequenze di fessurazione per unità di lunghezza delle tubazioni di una piattaforma *off-shore* sono riportate in Figura 22. Si noti come la probabilità che i fori di rottura abbiano piccoli diametri sia più alta rispetto alle altre casistiche. Al converso, si osserva che rotture con un foro maggiore di 5 cm costituiscono eventi rari. La presente trattazione si occupa di modellare il foro di rilascio da 3 cm, appartenente al range messo in evidenza nella figura precedente. Il foro di rilascio da 1 cm invece, è stato modellato da E. Maffia nel suo lavoro di tesi [38] svolto in parallelo al presente.

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	1.5E-05	9.5E-06	8.6E-06	8.1E-06	7.7E-06	7.7E-06
3 to 10	6.4E-06	3.9E-06	4.2E-06	4.8E-06	4.9E-06	4.9E-06
10 to 50	2.8E-06	1.6E-06	2.1E-06	3.0E-06	3.3E-06	3.3E-06
50 to 150	1.0E-06	3.2E-07	5.2E-07	9.7E-07	1.2E-06	1.2E-06
>150		2.0E-07	4.6E-07	1.3E-06	1.7E-06	1.7E-06
TOTAL	2.5E-05	1.6E-05	1.6E-05	1.8E-05	1.9E-05	1.9E-05

Figura 22 – Frequenza di rottura in funzione del diametro della tubazione [39].

Ciò che accomuna i 2 set di simulazioni presentati in Tabella 3, è sicuramente:

- Forma dell'ostacolo;
- Diametro dell'ostacolo *D<sub>cil</sub>*;
- Distanza fra la sorgente di rilascio e il centro dell'ostacolo *l*.

I componenti maggiormente presenti su una piattaforma *off-shore* sono compressori, pompe, separatori e tubazioni, assimilabili perlopiù a forme cilindriche o pareti piane. La scelta di utilizzare come ostacolo una forma cilindrica si basa sulle evidenze emerse nel lavoro di [40]. Utilizzando come ostacolo una superficie piana infatti, si incorre nell'effetto

di bloccaggio, ovvero il fenomeno per cui il getto che impatta contro la parete esaurisce la sua inerzia. L'accumulo locale del metano non permette di sfruttare il modello della SB, in quanto metà di essa non viene raggiunta dal gas. Il fenomeno è illustrato in Figura 23.



Figura 23 – Effetto di bloccaggio di una parete piana.

# **4.2 Pre-processing**

La modellazione dei rilasci incidentali di gas è stata realizzata tramite il solver fluidodinamico ANSYS Fluent, software commerciale il cui input file è compilato in C. Nella presente trattazione è stata utilizzata la licenza ANSYS Academic nella versione ANSYS 2020 R2. Le maggiori applicazioni del software riguardano la modellazione dei flussi fluidi, dello scambio di calore e delle reazioni chimiche in geometrie complesse [41]. La scelta di utilizzare tale software è stata condizionata dalle seguenti caratteristiche dello stesso:

- Precisione e robustezza della soluzione;
- Possibilità di utilizzare i processori in parallelo;
- Vasta gamma di modelli fisici.

La capacità del software di compiere calcoli in parallelo permette di ridurre significativamente il tempo computazionale, che nel caso in questione è decisamente oneroso (l'*elapsed time* stimato è di  $\approx$  14-15 ore per una simulazione caratterizzata da alte pressioni di rilascio).

La possibilità di implementare una vasta gamma di modelli fisici rappresenta un valore aggiunto per questo studio in quanto agevola la modellazione di miscele di fluidi e dei fenomeni di turbolenza a due equazioni, come ad esempio il k- $\omega$  e il k- $\varepsilon$ .

In aggiunta, l'integrazione di Fluent all'ambiente Workbench di ANSYS ha permesso di ottenere un'interfaccia efficiente e flessibile con altri strumenti (CAD, ambiente di meshing e post-processing). Precisamente, ANSYS Workbench è un ambiente che consente di costruire l'analisi fluidodinamica di interesse. Ogni analisi è caratterizzata da diverse *cells*, caselle da cui l'utente accede ai vari tool di ANSYS e inserisce i dati di input per ogni fase della modellazione. L'analisi è costruita secondo un approccio *top to bottom* tra i vari strumenti, caratterizzato dal seguente flusso di informazioni:

- Realizzazione del CAD;
- Costruzione della griglia di calcolo (mesh);
- Setup della simulazione;
- Post-processing dei risultati.

Ripercorrendo il flusso delle informazioni da un *tool* all'altro, nelle prossime sezioni è illustrata la modellazione del rilascio incidentale.

# 4.2.1 Modellazione geometrica

Il problema in analisi è costituito da una tubazione di metano accidentalmente forata dalla quale si origina un getto sottoespanso che investe la tubazione di metano adiacente. Il rilascio è raffigurato nell'immagine sottostante.



Figura 24 - Schematizzazione del fenomeno di rilascio.

Questo scenario può essere modellato tramite un ugello convergente che funga da sorgente di rilascio e un cilindro che rappresenti l'ostacolo all'interno del dominio prestabilito, la *Source Box*. Pertanto, data la semplicità della geometria di interesse, si è scelto di utilizzare uno strumento interno ad ANSYS, DesignModeler. Il *tool* è definito come un "*parametric feature-based solid modeler*" [41] ed è progettato per creare sketch 2D, modellare geometrie in 3D o importare CAD 3D.

La caratterizzazione dimensionale della Source Box, così come dell'ostacolo, è stata trattata nel Capitolo 2. Per quanto riguarda la geometria dell'ugello convergente invece, si è scelto di fare riferimento a una trattazione precedente a questa [22] in cui la lunghezza dell'ugello e il diametro di inizio convergente sono pari a due volte il diametro del foro di rilascio. È importante sottolineare che la sorgente di rilascio, ovvero il foro nella tubazione di metano, è collocata nell'origine degli assi, pertanto è stato possibile ridurre il dominio computazionale a un quarto della geometria di partenza.



Figura 25 – Domini computazionali utilizzati.

I modelli 3D illustrati in Figura 25 sono stati ottenuti per estrusione dello sketch 2D della SB e per rivoluzione dello sketch raffigurante l'ugello. All'interno delle SB di Figura 25 si osservano dei volumi di controllo, leggermente diversi per i due modelli CAD. Essi sono entità geometriche fittizie utili nell'ambiente di meshing per infittire la griglia di calcolo in maniera differenziata. Le zone generate sono quattro e sono visibili nell'immagine sottostante (Figura 26):

- Zona 1: il volume di controllo che ingloba l'ostacolo serve per risolvere l'interazione flusso-ostacolo;
- Zona 2: regione racchiusa dal parallelepipedo retrostante al cilindro per catturare gli effetti della scia;
- Zona 3: regione rettangolare che include le zone precedenti, è stata creata per consentire alla mesh di crescere in maniera progressiva e prevenire una lenta o mancata convergenza;
- Zona 4: volume di controllo rettangolare costruito con lo stesso criterio adottato per la zona 3.



Figura 26 – a) Zona 1; b) Zona 2; c) Zona 3; d) Zona 4.

## 4.2.2 Generazione della griglia di calcolo

La costruzione della griglia di calcolo è un punto cruciale per la corretta modellazione del fenomeno fisico. L'ambiente utilizzato per questa fase della modellazione è ANSYS Meshing. La griglia è generata in maniera automatica e per discretizzare le equazioni di Navier-Stokes utilizza il metodo dei volumi finiti.

Per simulare i rilasci appartenenti ai diversi *set* sono state realizzate due griglie di calcolo in quanto a 50 bar è emersa l'esigenza di rifinire gli elementi che circondano la parete cilindrica. Entrambe le griglie appartengono alla categoria di mesh non strutturate, ovvero le celle di cui sono composte seguono una disposizione irregolare e non sono quindi identificabili con una terna cartesiana  $(\hat{i}, \hat{j}, \hat{k})$ . La disposizione arbitraria delle celle consente maggiore flessibilità di utilizzo, soprattutto nella generazione di infittimenti locali della mesh. Di contro, l'onere di calcolo e di memoria accresce rispetto alle griglie strutturate, in quanto il problema algebrico da risolvere è appesantito dalle matrici di calcolo non più diagonali. Le due griglie generate sono molto simili tra di loro, ciò che cambia è il grado di finitura: a 50 bar si è manifestata l'esigenza di ridurre il valore dell'*element size* a contatto con gli *inflation layers* della parete per poter risolvere gradienti sempre più elevati.

Tra le molteplici possibilità a disposizione, le celle sono state generate usando il metodo *Tetrahedrons*, ovvero un Delaunay 3D Tetra Mesher. In seguito, sono stati applicati degli infittimenti prismatici a contatto con le pareti del particolare problema geometrico e dei *grid adaption* (rifinimento della griglia aumentando la densità delle celle in determinati regioni dello spazio) progressivi lungo le dimensioni della SB. I primi sono essenziali per risolvere gli effetti dello strato limite che si genera quando un fluido interagisce con le pareti (l'ugello e il cilindro per quanto riguarda la presente trattazione). Essi sono realizzati tramite l'*inflation layers control*, un comando che permette di creare strati di celle prismatiche che si estendono per tutto lo spessore dello strato limite. Le celle presenti in questa regione sono soggette ad alti *aspect ratio*. Le celle prismatiche, rispetto alle tetraedriche, non deteriorano la qualità della mesh quando soggette ad alti *aspect ratio*. In Figura 27 è raffigurato un esempio di inflation layers per il cilindro.



Figura 27 – Inflation layers del cilindro.

Gli strati prismatici sono stati generati fornendo al software l'altezza del primo strato. Questa informazione è strettamente legata al parametro numerico  $y^+$ , ovvero la distanza adimensionale dalla parete solida:

$$y^+ = \frac{u^* y}{\nu} \tag{4.1}$$

Si raccomanda un valore inferiore all'unità, tuttavia nel presente lavoro si è deciso di eccedere garantendo un valore  $y^+$  al massimo pari a 5. In questo modo l'altezza del primo strato non risulta eccessivamente piccola rispetto alle dimensioni della geometria. L'altezza del primo strato è stata impostata pari a  $6e^{-6}$  m per il cilindro e  $6e^{-6}$  m per l'ugello.

L'infittimento della griglia invece, è stato realizzato secondo due criteri:

- Body of influence;
- Sphere of influence.

Il primo si serve dei volumi di controllo generati nel CAD per infittire progressivamente la griglia partendo da zone a contatto con il cilindro maggiormente rifinite e finendo in zone confinanti con le superfici di outlet meno popolate da celle. Infatti, allontanandosi dalla sorgente e dall'ostacolo, ci si aspetta che i fenomeni di comprimibilità siano sempre più deboli. Il secondo permette di creare dei corpi fittizi sferici sempre con lo scopo di rifinire alcune regioni in cui si prevedono repentine e numerose variazioni delle grandezze principali del flusso. Se ne sono utilizzate due, caratterizzate da diverso infittimento, centrate rispettivamente all'uscita dell'ugello e a 6 cm dalla sezione di gola. Questa configurazione è stata studiata per catturare i forti effetti di comprimibilità e di sottoespansione del getto che portano alla formazione del disco di Mach ed è illustrata in Figura 28.



Figura 28 - refinement della griglia.

A questo punto sono state generate le griglie di calcolo. La prima, utilizzata per le simulazioni con le più basse pressioni di rilascio, è composta da 318334 nodi e 1316161 elementi mentre la seconda da 296373 nodi e 1160231 elementi. In Figura 29 è possibile apprezzare le differenze, seppur minime, tra le due griglie. Sulla superficie symmetry della griglia 2 è stato ottimizzato il refinement degli elementi riducendo le dimensioni delle zone d'infittimento. In questo modo è stato possibile rifinire la regione a contatto con la parete cilindrica senza che il numero totale di elementi aumentasse eccessivamente.



Figura 29 – Griglia 1 e 2 a confronto.

Si è detto che l'accuratezza e la stabilità del calcolo numerico dipendono dalla qualità della griglia di calcolo. Prima di procedere con l'impostazione del problema fluidodinamico è importante verificare che le celle rispettino i seguenti parametri di qualità:

- Skewness;
- Orthogonal Quality;
- Aspect ratio.

Il manuale di Fluent [41] definisce la *skewness* come la differenza tra la forma della cella generata e la forma della cella equilatera di uguale volume. Quanto più le celle si avvicinano al valore 0 (forma equilatera) tanto più aumenta la qualità della mesh. Tuttavia, un valore minore di 0.5 basta per poter generare una griglia di qualità intermedia. Il parametro serve per controllare e limitare la formazione di celle *highly skewed* in quanto influirebbero negativamente sull'accuratezza e la stabilità della soluzione. L'*orthogonal quality* è un parametro che riguarda l'allineamento di due celle adiacenti e basti sapere che ci si auspica di raggiungere un valore vicino all'1. L'*aspect ratio* misura l'allungamento di una cella,

ovvero il rapporto tra la lunghezza dello spigolo più lungo e quella dello spigolo più corto. Il valore ideale si avvicina a 1 per fluidi multidimensionali. Tramite il tool Mesh Metrics di ANSYS è possibile visualizzare lo spettro dei valori dei parametri di qualità assunti dalle celle generate, riportato in Figura 30.



Figura 30 – Indicatori della qualità della griglia di calcolo.

Si può concludere che globalmente la griglia di calcolo ottenuta è soddisfacente, tuttavia qualche perfezionamento potrebbe giovare alla convergenza delle soluzioni. Per essere certi di aver risolto in maniera appropriata lo strato limite attorno all'ostacolo si deve monitorare il  $y^+$ . In tutte le simulazioni effettuate il valore medio di tale parametro è nell'intorno dell'unità.

### 4.2.3 Setup dell'analisi fluidodinamica

L'impostazione dell'analisi fluidodinamica è importante perché costituisce la fase in cui si sceglie quale modello matematico meglio caratterizza il fenomeno in analisi. Per prima cosa bisogna predisporre il setup generale della simulazione, ovvero impostare la tipologia di solver (pressure-based o density-based) e di regime (transitorio o stazionario). In base a [42] si è scelto di implementare un algoritmo *pressure-based*. Il regime in cui si è studiato il fenomeno è stazionario: in un lavoro precedente a questo G. Ledda [20] ha eseguito le simulazioni in entrambi i regimi. I fenomeni risultano modellizzati correttamente in entrambi i casi, ma il regime transitorio implica costi computazionali elevati. In più, nelle impostazioni generali, c'è la possibilità di tenere in considerazione gli effetti di

galleggiamento del fluido: per questa prima fase del modello *Two-Steps* la funzione è disabilitata considerando che ad alti Reynolds (nel caso in analisi Re  $\approx 10^6$ ) gli effetti predominanti sono quelli inerziali.

Una volta stabilite le impostazioni generali del problema, si procede nel definire quali modelli meglio rappresentano i fenomeni in analisi. Nel presente studio si è interessati ad abilitare:

- L'equazione dell'energia;
- I modelli viscosi (modelli di turbolenza);
- Il trasporto delle specie.

L'equazione dell'energia è utile per modellare lo scambio termico, che nel caso in analisi è causato da fenomeni di dissipazione viscosa, di diffusione delle specie e di conduzione.

Il modello di turbolenza selezionato è il k- $\omega$  SST perché il suo utilizzo consente di modellare adeguatamente lo strato limite e, siccome prevede la risoluzione dell'equazione di trasporto dello sforzo di taglio turbolento, è in grado di predire flussi caratterizzati da forti gradienti di pressione avversi [43]. Quindi oltre ai fenomeni di comprimibilità è in grado di predire correttamente anche la separazione del flusso. Per questi motivi spesso rappresenta la miglior scelta per la modellazione aerodinamica.

Infine, il trasporto delle specie è fondamentale per la modellazione di una miscela di gas: metano e aria. Quest'ultima si assume essere composta da ossigeno e azoto, presenti nelle percentuali volumetriche standard. Sono trascurate eventuali composizioni di anidride carbonica e acqua poiché tra gli obbiettivi della trattazione non figurano gli studi sugli effetti di ossidazione della miscela, ovvero di un suo eventuale innesco. Attivando il modello *species transport*, il software risolve l'equazione di conservazione per le specie considerate. Gli effetti di comprimibilità della miscela sono tenuti da conto imponendo la risoluzione dell'equazione dei gas ideali per la densità. Tutte le altre proprietà della miscela (conduttività termica e viscosità) sono tenute costanti. Anche i coefficienti di diffusione delle varie specie sono costanti; essi sono stati impostati secondo il metodo dilute-approx che permette una differenziazione dei coefficienti. I valori delle proprietà menzionate sono riportati in Tabella 4.

C. termica	Viscosità	Coeff di diff. CH <sub>4</sub>	Coeff di diff. <b>0</b> <sub>2</sub>	Coeff di diff N <sub>2</sub>
0.0454 [W/m-K]	1.72e-5 [kg/m-s]	2.1e-5 [m <sup>2</sup> /s]	2e-5 [m <sup>2</sup> /s]	2.1e-5 $[m^2/s]$

Tabella 4 – proprietà della miscela aria-metano.

A questo punto bisogna imporre le condizioni al contorno del problema. Essendo coinvolte le equazioni della quantità di moto, dell'energia e del trasporto delle specie, le condizioni al contorno dovranno essere specificate per tutte e tre le casistiche. La superficie conica dell'ugello e l'ostacolo cilindrico sono considerate delle pareti stazionarie. La condizione al contorno per la quantità di moto è la condizione di No-Slip, per l'energia si applica la condizione adiabatica, ovvero si riproduce la situazione in cui non c'è scambio di calore e per le specie si imposta *zero diffusive flux*. Infine, le superfici giacenti sui piani XZ e XY sono facce di simmetria, quindi le condizioni imposte saranno quelle di simmetria. Attraverso questi piani i flussi di tutte le quantità sono pari a zero: sia quelli convettivi che quelli diffusivi. La conseguenza diretta di quanto affermato è che la velocità normale al piano di simmetria, avendo uno sforzo di taglio a parete nullo è considerata una *slip wall* nel contesto dei fluidi viscosi. La sezione di area maggiore dell'ugello costituisce un *mass flow inlet*, mentre le superficie che delimitano la SB sono considerate dei *pressure outlet*. Le condizioni al contorno applicate sono riassunte in Tabella 5 per chiarezza e visualizzate in Figura 31.

Superficie geometrica	Condizione al contorno
Inlet	Mass Flow Inlet
Wall-nozzle	Wall
Back, Lateral, Up_down, Front	Pressure Outlet
Symmetry	Symmetry
Wall-cyl	Wall

Tabella 5 - Condizioni al contorno.



Figura 31 – Superfici della Source Box.

Infine, si stabiliscono i metodi numerici per discretizzare le relazioni matematiche e gli algoritmi per risolvere il problema algebrico. Quest'ultimo è risolto per mezzo di un algoritmo *Coupled*, il quale risolve contemporaneamente le equazioni di conservazione per la quantità di moto e per la massa.

## 4.3 Post-processing

In questa sezione si elaborano e discutono i risultati delle simulazioni, processati tramite l'ambiente CFD-post di ANSYS. In prima analisi si vuole dimostrare la consistenza fisica dei risultati sia da un punto di vista qualitativo che quantitativo. Dopodiché si procede indagando ulteriori aspetti, cercando di individuare gli andamenti di alcune grandezze al crescere delle pressioni di rilascio. Questa analisi secondaria consente sicuramente di approfondire il fenomeno fisico studiato, ma soprattutto di effettuare un successivo confronto con i risultati forniti dal metamodello, testandone quindi le capacità predittive.

La verifica qualitativa per la corretta modellazione del fenomeno fisico si può effettuare visualizzando i profili di velocità e di frazione massica di metano sulle facce di outlet e di simmetria della Source Box. La mappa di velocità sulla superficie di simmetria si presenta come in Figura 32 per la pressione di rilascio pari a 30 bar.



Figura 32 – Contour di velocità sul piano di simmetria XY,  $p_{ril}$ =30 bar.

Come previsto dalla teoria dei getti estremamente sottoespansi, a partire dalla sezione di gola dell'ugello il fluido passa da una velocità sonica a una supersonica, andando incontro a diversi fenomeni di compressione ed espansione finché non si forma il disco di Mach. A valle di esso si individuano due regioni: una caratterizzata da un regime subsonico e l'altra da un regime ancora supersonico, poiché racchiude la corrente proveniente da un urto obliquo e non normale. La pressione a valle del disco di Mach raggiunge quella ambiente e rimane pressoché costante fino a quando non impatta con l'ostacolo, dove subisce un incremento che porta a una zona di ricircolo del flusso, visibile nell'immagine ingrandita di Figura 32. A questo punto il flusso di metano risale il cilindro e si propaga verso le facce di outlet. Il profilo di velocità su di esse si presenta come nelle immagini di Figura 33.



Figura 33 - Contour di velocità sull'up\_down (piano XZ) e sul front (paino YZ).

Sulla superficie di up\_down è visibile la scia turbolenta del getto, la cui inerzia spinge il metano a depositarsi sulla faccia di front piuttosto che sulla faccia "lateral". Questo fatto è visibile anche sulla superficie front: muovendosi lungo l'asse z negativo, e quindi verso il piano lateral, la frazione di metano tende a progressivamente a diminuire. All'aumentare delle pressioni di rilascio i profili rimangono pressoché simili, se non per le diverse posizioni assunte dal disco di Mach, un diametro crescente dello stesso e il verificarsi di una anomalia sulla superficie di up\_down a partire da 45 bar. A circa 95° dal *leading edge* del cilindro si inizia a visualizzare un picco di velocità e di frazione massica sempre più significativo che verrà indagato successivamente in questa trattazione.

A questo punto si analizzano le mappe di frazione massica, riportate in Figura 34 sempre per una pressione di rilascio pari a 30 bar. La concentrazione di metano nel *core* del getto è unitaria e decresce sia all'aumentare della distanza dal foro di rilascio che allontanandosi dall'asse del getto in direzione radiale, a causa degli effetti di entrainment con l'aria. Osservando la superficie superiore della SB si nota come il getto sia altamente direzionato alle alte velocità e quindi come il metano si concentri maggiormente sulla faccia frontale alla sorgente di rilascio piuttosto che sulla superficie di up\_down. Dopo l'impatto con il cilindro la concentrazione di metano si riduce sensibilmente in quanto l'ostacolo promuove il miscelamento nell'ambiente circostante.



Figura 34 – profili di frazione massica del metano ( $p_{ril} = 30 \ bar$ ).

Il motivo per cui i risultati sono stati visualizzati solo su due delle quattro facce di output della *Source Box* riguarda il fatto che i valori medi di velocità e frazione massica sulle superfici di back e lateral sono esigui e di conseguenza irrilevanti ai fini della trattazione. Fisicamente la carenza di metano su queste due facce è giustificata dal fatto che il gas tende sempre ad aggirare l'ostacolo e a richiudersi attorno ad esso dopo averlo superato. Pertanto, le quantità rilevate sulle facce esterne sono minime e caratterizzate da poca inerzia. Le considerazioni qualitative effettuate per la pressione di rilascio pari a 30 bar rimangono valide per le simulazioni con pressioni di rilascio più alte. Principalmente, ciò che cambia notevolmente all'aumentare della pressione di rilascio è il diametro del getto e del disco di Mach, la posizione assiale del disco di Mach e la comparsa di un picco di velocità e di concentrazione di metano sempre più marcato dai 45 bar in su.

Per apprezzare la variazione del diametro del disco di Mach oltre che da un punto di vista qualitativo, anche da un punto di vista quantitativo, si è deciso di calcolarne il valore tramite la correlazione indicata nel lavoro di P. Franquet et al. [30]. Per  $\eta_0$  elevati la correlazione da usare è la seguente:

$$\frac{D_{MD}}{D_e} = \begin{cases} 0.36\sqrt{\eta_0 - 3.9} \text{ for contoured nozzle} \\ 0.31\sqrt{\eta_0 - 5} \text{ conical nozzle or orifice} \end{cases}$$
(4.2)

Dove  $D_e$  rappresenta il diametro del foro di rilascio nel caso in analisi. La crescita del diametro del disco di Mach è quasi lineare:

p <sub>ril</sub> [bar]	10	20	30	40	50	60	70	80
D <sub>Mach</sub> [cm]	2.0795	3.6019	4.6500	5.5020	6.2386	6.8971	7.4979	8.0540

Tabella 6 – Diametro del disco di Mach.

Per quanto riguarda il diametro del getto invece, non esistono correlazioni in letteratura che possano essere applicate a questo specifico studio. L'unica osservazione in merito pertanto riguarda la diretta proporzionalità fra dimensioni del getto e pressione di rilascio.

Le posizioni del disco di Mach, valutate tramite le formule rinvenute in letteratura e descritte nel Capitolo 2 sono riportate in Tabella 7:

p <sub>ril</sub> [bar]	10	20	30	40	50	60	70	80
x <sub>Mach</sub> [cm]	6,079	8,597	10,529	12,158	13,593	14,890	16,083	17,194

Tabella 7 – posizione teorica del disco di Mach al variare delle pressioni di rilascio.

Per accertarsi di aver riprodotto un fenomeno fedele alla realtà, i risultati in Tabella 7 sono stati confrontati con la posizione del disco di Mach ottenuta grazie ai risultati numerici. Ovviamente l'ambiente di post-processing non è in grado di fornire direttamente tale grandezza, perciò si è pensato di ricostruire i profili di velocità lungo l'asse del getto, dal momento in cui esso si sviluppa fino a che non impatta contro il cilindro. Dalla teoria è noto che a monte di un urto normale la velocità sia supersonica, mentre a valle sia subsonica. Pertanto, si è pensato di localizzare il disco di Mach in corrispondenza del valore medio delle velocità comprese tra il picco e il minimo locale visibile nei profili di velocità lungo l'asse x di Figura 35.



Figura 35 – Profili di velocità lungo l'asse per  $p_{ril}$  di 10 e 80 bar.

Effettuando la media di una funzione discreta (si è in possesso di soli 1000 valori di velocità) è possibile che il valore ottenuto non appartenga ai punti selezionati. Quindi, per risalire alla posizione del disco di Mach, si è pensato di implementare due curve di fitting nell'ambiente di programmazione MATLAB:

- Regressione lineare semplice;
- Spline fitting.

La seconda è una combinazione di seni e coseni che interpola i punti noti dalle simulazioni numeriche. Entrambe approssimano in maniera accurata l'andamento numerico, ma lo *spline fitting* richiede un tempo di risposta maggiore. Pertanto, si è scelto di analizzare i risultati provenienti dalla regressione lineare.


Figura 36 - Curve di fitting e curva sperimentale.

Quindi, confrontando i risultati teorici di Tabella 7 con quelli numerici e calcolando l'errore relativo nella localizzazione del disco di Mach, si ottiene quanto illustrato graficamente in Figura 37 e Figura 38. Per pressioni di rilascio inferiori ai 40 bar il modello sovrastima la posizione a cui si sviluppa l'urto normale con errori relativi decrescenti secondo un andamento quasi parabolico, fatta eccezione per la prima simulazione. Per pressioni superiori ai 40 bar invece il modello sottostima la posizione di formazione del disco di Mach con errori relativi crescenti anch'essi secondo un trend parabolico. Il fatto che l'errore diminuisca per poi aumentare nuovamente, ha una spiegazione di natura fenomenologica; per basse pressioni di rilascio il disco di Mach si sviluppa quasi a ridosso della sezione di gola dell'ugello, suggerendo che la rappresentazione di fenomeni di comprimibilità in uno spazio così ridotto sia molto complicato. Al contrario, dopo i 40 bar la posizione del Disco di Mach si trova non più a ridosso dell'ugello ma dell'ostacolo, motivo per cui l'errore torna a salire e a diventare significativo per le pressioni di rilascio pari a 70 e 80 bar. In riferimento al grafico sulla sinistra, la sottostima e la sovrastima dei valori può essere dovuta alla diversa griglia di calcolo utilizzata per i due range di pressione.

Osservando il grafico raffigurante l'andamento dell'errore relativo, il massimo è pari al 13 % e si ottiene in corrispondenza di una pressione di rilascio pari a 80 bar.

I grafici di Figura 39 invece rappresentano l'evoluzione della frazione massica e della velocità media sulle superfici di front e up\_down al crescere delle pressioni. Le due grandezze sul front hanno un andamento sempre crescente, in accordo con la fisica del problema. Infatti, aumentando le pressioni, aumenta anche la portata di metano che fuoriesce, causando un incremento delle quantità di metano che si depositano sul front. Le osservazioni rimangono valide per la superficie di up\_down, che però vede un decremento delle grandezze passando da 40 bar a 50 bar. Probabilmente il fenomeno risiede nell'utilizzo di due griglie di calcolo distinte, in quanto una sottostima della griglia due si era già manifestata nel calcolo della posizione del disco di Mach.



Figura 37 – posizione del Disco di Mach.



Figura 38 - Errore relativo sulla posizione del disco di Mach.



Figura 39 – andamento della velocità (sinistra) e della frazione massica (destra) sulle superfici di front e up\_down.

In aggiunta si è voluto analizzare che la distribuzione di pressione attorno al cilindro per y=0 m rispettasse le previsioni teoriche, argomentate sempre nel Capitolo 2. Il grafico in Figura 40 è in funzione dell'angolo  $\theta$ , ovvero l'angolo che dal bordo di attacco del cilindro che permette di definirne la curvatura. Per un fluido non viscoso ci si aspetta un andamento sinusoidale di pressione attorno al cilindro. Per un fluido reale invece, l'andamento sulla prima metà del cilindro è simile a quello ideale. Infatti, aumentando  $\theta$  il  $C_P$  diminuisce fino a toccare un minimo per poi aumentare nuovamente. Le differenze si notano per un angolo maggiore di 90°. Siccome nei fluidi viscosi avviene la separazione del flusso, la pressione che si rileva dopo i 90° cresce e si stabilizza a un valore costante e pari alla pressione freestream. Si noti che il minimo toccato dal  $C_P$  si trova in corrispondenza di due posizioni diverse per i due casi: questo è dovuto al fatto che per Reynolds maggiori (quindi il caso a 80 bar) la separazione del flusso avviene per theta maggiori, in quanto l'inerzia del flusso fa sì che esso non perda l'aderenza al cilindro.



Figura 40 – coefficiente di pressione in funzione dell'angolo  $\theta$ .

#### 4.3.1 Criticità riscontrate e risoluzione

A partire dalle simulazioni con pressione di rilascio maggiore o uguale a 40 bar è stato rilevato un picco inaspettato di velocità e di frazione massica sulla superficie di up\_down. Questo picco, come è visibile dalle immagini di Figura 41, progredisce all'aumentare della pressione di rilascio. Considerate le alte pressioni e le modeste portate in gioco, il picco è stato ricondotto alla presenza di un tubo vorticoso.



Figura 41 – Criticità riscontrate sulla superficie di up\_down.

Per indagare al meglio il fenomeno si è utilizzato il tool CFD-Post, dove esiste la possibilità di visualizzare le *vortex core region*, ovvero le zone del dominio in cui sono presenti dei vortici. I metodi per identificarli sono molteplici ed è importante saper scegliere quale adoperare. Il manuale di Fluent sottolinea come la scelta del metodo sia *case-dependent*. Facendo riferimento alla letteratura invece, è stato consigliato l'utilizzo delle iso-mappe di vorticità in quanto permette di visualizzare le circolazioni dovute alla differenza di velocità negli strati di scorrimento viscoso, oltre che alle vorticità macroscopiche del flusso.

In Figura 43 è possibile visualizzare le iso-mappe di vorticità su cui è tracciato il profilo di velocità dei vortici presenti nella simulazione con pressione di rilascio pari a 80 bar. In Figura 42 invece, si è riportata una immagine in prospettiva del problema studiato, in modo da chiarire la direzione da cui l'osservatore visualizza la vorticità del getto di Figura 43.



Figura 42 – Prospettiva dello sviluppo delle vorticità dall'ugello al cilindro.

Dopo aver consultato la letteratura [30] è emerso che nel mixing layer di un getto sottoespanso si verificano due tipologie di instabilità idrodinamiche: le instabilità di Kelvin-Helmoltz e di Taylor-Goertler. Le prime si sviluppano a causa degli strati di scorrimento viscoso tra un fluido ad alte velocità e uno a riposo. Gli scorrimenti viscosi generano i presupposti per la formazione di large eddies, i quali evolvono in anelli vorticosi trascinati a valle dall'inerzia del core. Le seconde invece sono causate dalla curvatura delle streamlines nel mixing layer. La curvatura è principalmente dovuta all'alto grado di espansione del fluido: maggiore sarà l'espansione più è accentuata la curvatura. A questi fattori si somma l'influenza del numero di Mach all'ugello e della tipologia di strato limite del getto. Il fluido che si trova nelle regioni di curvatura delle streamlines si muove secondo traiettorie curvilinee ed è sottoposto sia a forze centrifughe che a forti gradienti radiale di velocità. La combinazione di questi fattori dà origine a non-uniformità del flusso che si manifestano sottoforma di vortici con asse parallelo all'asse del getto di partenza.



Figura 43 – Illustrazione del getto sottoespanso a pressione di rilascio 80 bar.

Le instabilità idrodinamiche del mixing layer sono responsabili della formazione dei lobi numerati visibili in Figura 43. I lobi, impattando contro il cilindro, seguono traiettorie diverse. Il due e il tre sono poco influenzati dall'ostacolo. Al contrario il lobo 1, responsabile del picco, aderisce al cilindro. Il fatto che esso risalga il cilindro elicoidalmente può essere giustificato dalla presenza di gradienti di pressioni in ogni direzione. Infatti, la differenza di pressione lungo y consente al tubo vorticoso di ergersi. I gradienti lungo x e z lo deviano dietro al cilindro.

Il passo successivo è stato rispondere al quesito "come mai il fenomeno vorticoso non si verifica per tutte le simulazioni eseguite, ma solo a partire da pressioni di rilascio pari a 50 bar?". Per trovare la risposta sono state utilizzate le stesse iso-mappe citate precedentemente e applicate a ogni singolo case-study. In Figura 44 sono state riportate solo alcune tra le simulazioni con lo scopo di illustrare come si evolve la vorticità al crescere delle pressioni di rilascio.



Figura 44 – Iso-mappe di vorticità al crescere delle pressioni di rilascio.

Osservando attentamente la Figura 44 sulla sezione di gola dell'ugello si nota la formazione di strutture vorticose più o meno pronunciate a seconda del grado di sottoespansione del getto. Per la pressione di rilascio pari a 10 bar (in alto a sinistra) dopo la formazione del disco di Mach si osserva un fenomeno di coalescenza delle strutture vorticose a forma di "lobo". Il flusso, ormai a pressione ambiente e alla velocità di circa 10 m/s, impatta sul cilindro e aderisce su di esso lungo la sua altezza.

Aumentando la pressione di rilascio fino a 30 bar si osserva un ingrossamento delle strutture a lobo e un avvicinamento degli stessi all'ostacolo. La vicinanza all'ostacolo è sicuramente dovuta alla posizione del disco di Mach che, per pressioni maggiori, si sposta lungo la direzione positiva assiale del getto. Il flusso quindi, non essendo uniforme come nel caso precedente, investendo l'ostacolo comincia lievemente a diramarsi/direzionarsi. Questo discorso è molto più evidente a 50 bar, dove il fenomeno di espansione si è praticamente esaurito a ridosso dell'ostacolo. Il modulo della velocità con cui il getto impatta sul cilindro è maggiore e quindi il flusso anziché aderire sulla parete cilindrica, forma un tubo vorticoso che risale dietro al cilindro, fino alla posizione in cui si è identificato il picco di velocità e di concentrazione di metano. L'andamento elicoidale può essere causato dalla distribuzione di pressione sul cilindro: le mappe di pressione mostrano infatti gradienti abbastanza sviluppati sia lungo l'asse x che lungo l'asse y. La combinazione di tali gradienti potrebbe aver dato origine a un moto elicoidale lungo il cilindro. Inoltre, il fatto che a partire dalle simulazioni con 45 bar una parte del getto non aderisce/avvolge sul cilindro si spiega qualitativamente dal fatto che per pressioni maggiori il diametro del getto è notevolmente incrementato, fino a superare il diametro dell'ostacolo. Quindi esiste una parte di fluido che risente molto meno della presenza dell'ostacolo e che di fatto non impatta su di esso ma prosegue indisturbato.

Nelle immagini precedenti si è visto che il tubo vorticoso accelerava lungo il cilindro. Questa accelerazione causa un numero di Mach maggiore di 0.3 sulla superficie di up\_down, visibile in

Figura 45. Si vuole quindi effettuare un'ultima analisi per accertarsi che gli effetti di comprimibilità si esauriscano all'interno del dominio della *Source Box* per poter avallare le assunzioni del modello SBAM per cui al di fuori del dominio della SB il flusso può essere considerato incomprimibile e governato da effetti di galleggiamento. Nella pratica, questa condizione è soddisfatta se il numero di Mach è inferiore a 0.3. Per effettuare la verifica dunque sono stati realizzati i contour raffiguranti il numero di Mach delle facce di output per tutte le simulazioni. Il getto in realtà non accelera perché si sta espandendo, ma perché accelerato dalla parete cilindrica. Le mappe di densità infatti mostrano una densità sempre costante e si può concludere che gli effetti di comprimibilità si siano esauriti all'interno della SB.



Figura 45 – Mappe di verifica esaurimento comprimibilità.

### Capitolo 5 Discussione dei risultati

Il Capitolo 5 pone a confronto i risultati provenienti dalle analisi CFD e dal meta-modello ROM. Lo scopo è quello di determinare la bontà dei risultati approssimati dal modello ROM e di stabilire quindi se possa trovare applicazione nella fase di valutazione del rischio. In caso affermativo è necessario valutare le modalità di impiego dello strumento metamodello, mettendone in evidenza vantaggi e svantaggi. Nel commentare i risultati verrà formulata e implementata una serie di miglioramenti da apportare al meta-modello al fine di ridurne l'errore di approssimazione dei risultati.

#### 5.1 Risultati a confronto

Come anticipato nei paragrafi precedenti, il confronto tra i due ambiti di modellazione avviene per il set di validazione che comprende le pressioni di rilascio nel range  $20 \div 70$  bar. I criteri con cui giudicare la qualità dei risultati ottenuti da un ROM sono diversi da applicazione ad applicazione. Per il caso in analisi si è scelto in prima istanza di valutare criticamente i seguenti errori:

- 1. Errore globale;
- 2. Errore Infinito;
- 3. Errore parziale.

Il primo rappresenta l'errore globale di approssimazione del meta-modello: include quindi sia i profili di concentrazione di GN che i profili di velocità lungo le tre componenti. Esso è calcolabile per mezzo della norma euclidea riportata nella formula 5.1:

$$ERR_{GLOBALE} = \sqrt{\sum_{k=1}^{N} \left| \frac{v_{ROM_k} - v_{CFD_k}}{v_{CFD_k}} \right|^2}$$
(5.1)

Dove  $v_{ROM}$  è il vettore colonna contenente tutti i profili di tutte le superfici della SB approssimati dal meta-modello, mentre  $v_{CFD}$  contiene i profili estrapolati dalla simulazione CFD.

L'errore infinito è definito come il massimo del valore assoluto della differenza fra due vettori ed è calcolabile tramite la 5.2, ovvero per mezzo della nota norma infinito:

$$\|v\|_{\infty} = max_{i}(|v_{ROM_{i}} - v_{CFD_{i}}|)$$
(5.2)

In fase di valutazione degli errori si è soliti includere la norma infinito in quanto può verificarsi il caso in cui l'errore globale risulta basso, ma in realtà potrebbe essere indice di uno scostamento elevato che non emerge perché, discostandosi dall'errore medio, con la norma euclidea non se ne tiene conto. La norma quadratica "parziale" è calcolata come la norma euclidea, ma a differenza di quest'ultima, è stata valutata per ogni superficie di output della SB.

Definiti questi primi criteri di valutazione, si vuole indagare l'errore di approssimazione che produce il meta-modello addestrato fino al livello 3 della griglia di Smolyak. A tal proposito si riporta di seguito la tabella contenente gli errori di approssimazione globali appena formulati. Per consultare le tabelle riportanti le norme infinito e le norme euclidee parziali si faccia riferimento rispettivamente all'APPENDICE A e all'APPENDICE B.

p <sub>ril</sub> [bar]	Errore globale
20	0,2918 %
30	16,3609 %
40	28,5609 %
50	26,6095 %
60	7,3044 %
70	13,0533 %

Tabella 8 - Errore globale di approssimazione del livello 3 di addestramento.

Da quanto si evince, i più alti errori globali riscontrati corrispondono alle pressioni di rilascio di 40 e 50 bar. Muovendosi invece verso pressioni limitrofe agli estremi dell'intervallo di campionamento  $(10 \div 80 \text{ bar})$  l'errore si abbassa notevolmente. Questi risultati sono in linea con le aspettative in quanto l'algoritmo di Smolyak tende a generare un maggiore numero di punti di addestramento verso l'estremità dell'intervallo considerato. Nel caso in analisi pertanto, l'errore maggiore si riscontra per pressioni appartenenti allo spazio dei parametri meno infittito. Durante la fase di addestramento infatti, solo una simulazione ( $p_{ril} = 45$  bar) tra tutte quelle fornite risulta essere rappresentativa per i nostri casi peggiori. Per quanto riguarda invece l'errore più basso calcolato, esso si presenta per una pressione di rilascio di 20 bar. La motivazione risiede proprio nel fatto che, coerentemente a quanto affermato prima, nell'intorno di 20 bar sono state fornite più simulazioni a cui il modello ROM può fare riferimento durante la fase di interpolazione.

Dopo aver condotto un'analisi preliminare sul valore degli errori riscontrati, si procede analizzando le tabelle in APPENDICE A e APPENDICE B, contenenti rispettivamente gli errori valutati con la norma infinito e la norma quadratica parziale. Questo passaggio è fondamentale per meglio comprendere quali siano i fattori che più contribuiscono all'errore globale e per fare luce sulle possibilità di intervento per ridurre l'errore totale.

Dalle tabelle riportanti le norme infinito si possono individuare errori molto significativi di tutte le grandezze in gioco (esclusa la concentrazione di metano) sulla superficie di *back*, di *front* e di *lateral*. Chiaramente questi errori influenzano l'andamento dell'errore totale. Si ricordi che la superficie *back* corrisponde alla faccia della SB contenente la sezione di gola dell'ugello. La particolarità di tale superficie risiede nell'avere alti valori di velocità in una porzione di spazio estremamente ridotta, mentre nella restante parte valori di velocità trascurabili. Infatti, l'ingombro dell'ugello fittizio è minimo se rapportato alle dimensioni del back e in più, in corrispondenza di esso, la velocità del getto è sonica. Data la peculiarità di tale fenomeno, è molto probabile che il meta-modello non sia in grado di rappresentare accuratamente valori quasi puntuali e così discostanti dal valore medio di velocità sulla superficie.

In merito alla superficie *front* invece, errori così elevati possono essere ricondotti alle ricircolazioni, a valle del cilindro, di gas naturale che si è distaccato dalla corrente primaria per effetto della turbolenza e dell'entrainment con l'aria circostante. Questi fenomeni non sono ben catturati già nell'ambito della fluidodinamica computazionale quindi in conformità a ciò, ci si aspetta che anche il meta-modello non sia in grado di risolvere tali moti.

Infine, anche gli errori di predizione sulla superficie *lateral* sono riconducibili principalmente alle componenti della velocità e quindi, a possibili moti di ricircolo non catturati durante la fase di modellazione fluidodinamica.

Per una verifica qualitativa di quanto affermato interpretando gli errori di approssimazione, si osservino le immagini di Figura 46. Esse illustrano i profili della componente x di velocità per tutte le superfici di output della SB per il caso di pressione di rilascio con errore globale di approssimazione peggiore ( $p_{ril} = 40$  bar). La colonna di sinistra riporta i profili provenienti dalla CFD, mentre la colonna sulla destra presenta i profili predetti dal modello ROM. Si osservino dapprima le superfici  $up\_down$  e front, le più rilevanti in merito a quantità di gas depositato e valori di velocità. A fronte di un errore del 28,5 % le discrepanze tra CFD e ROM sono nette.

La superficie  $up\_down$  ricostruita dal ROM è in grado di predire correttamente la localizzazione dei picchi di velocità, ma sovrastima di parecchio il valore della componente x. A circa 110° dal bordo di attacco del cilindro infatti, il picco approssimato dal ROM presenta valori di velocità maggiori di 10 m/s rispetto alla stima della CFD.

La superficie *front* presenta anch'essa una sovrastima dei picchi di velocità, ma a differenza dell'*up\_down* anche l'estensione del picco è maggiore rispetto alla CFD. In più sono visibili zone a bassa velocità riconducibili alle regioni di ristagno dovute alle ricircolazioni menzionate precedentemente.

Osservando infine le superfici *back* e *lateral*, è subito evidente la difficoltà che il metamodello presenta nel riprodurre profili tanto complessi. I profili sul *back* sono caratterizzati da valori di velocità molto elevati e localizzati in una porzione ridotta dello spazio (angolo inferiore destro della superficie, in prossimità dell'ugello fittizio). I profili sul *lateral* presentano valori di velocità molto bassi e di segno opposto. Le differenze di segno sono molto complesse da riprodurre: probabilmente la loro natura è di tipo numerico e non fisico. Pertanto, sono casuali e non prevedibili dal meta-modello.



Figura 46 – Profili provenienti dalla CFD (sinistra) e profili predetti dal ROM (destra) per il caso con errore globale massimo p=40 bar.

Quindi, per riassumere, considerati gli errori con cui il meta-modello ha generato i profili di velocità e di concentrazione del metano, sono emerse le seguenti considerazioni:

- L'errore globale maggiore è pari al 28,5 % e si verifica per una pressione di rilascio di 40 bar. Questo punto di validazione si trova in una regione poco infittita dalla griglia di Smolyak;
- 2) Osservando le norme euclidee parziale e infinito sulla superficie *back* e *lateral*, si evince quanto questi errori siano elevati. La ragione è stata ricondotta alla difficoltà di modellare una superficie sulla quale coesistono valori molto alti di velocità concentrati in corrispondenza dell'ugello e valori bassissimi sulla restante superficie.

A valle delle osservazioni scaturite sia a livello quantitativo che qualitativo, è evidente che un errore del 28,5 % debba essere ridotto per consentire al meta-modello di effettuare delle approssimazioni quanto più conformi ai risultati dei modelli CFD (che a loro volta introducono già una approssimazione), quantomeno sulle superfici di *up\_down* e *front*. Considerando che i punti di addestramento forniti al modello ROM con il livello 3 della griglia di Smolyak sono limitati (solo 9 simulazioni), si procede con un ulteriore addestramento del meta-modello, estendendolo al livello 4. Quest'ultimo prevede l'aggiunta di altre 8 simulazioni. I risultati ottenuti sono esposti nel paragrafo 5.1.

#### 5.2 Infittimento dei punti di addestramento e risultati

Per ridurre gli errori di approssimazione del meta-modello si può pensare di infittire la regione della griglia caratterizzata da pochi punti di addestramento. Si è riflettuto sulla metodologia di infittimento, ovvero se proseguire con l'algoritmo di Smolyak o se utilizzare dei punti di addestramento uniformi. Il **vantaggio** di utilizzare Smolyak risiede nel poter sfruttare la caratteristica di adattività: siccome i vari livelli sono annidati, è possibile aumentare il livello (quindi l'infittimento) senza dover ricominciare da zero. Lo **svantaggio** dell'algoritmo risiede nella sua bassa efficienza quando applicato a uno spazio dei parametri a una sola dimensione. Nel caso in analisi infatti, l'unico parametro campionato è la pressione di rilascio. Si è scelto di continuare l'infittimento con la griglia di Smolyak, estendendola al livello 4. In questo paragrafo si ripete l'analisi degli errori di approssimazione precedentemente effettuata per il livello 3 di addestramento.

p <sub>ril</sub> [bar]	Errore globale
20	0,2839 %
30	13,1281 %
40	27,4103 %
50	6,2356 %
60	7,0122 %
70	13,3806 %

Tabella 9 - Errore globale di approssimazione del livello 4 di addestramento.

Osservando Tabella 9 si nota che l'errore totale di approssimazione è evoluto nel seguente modo. Globalmente è diminuito per tutti i casi di validazione. In particolare, per il caso a 40 bar, la diminuzione dell'errore è stata rilevata, ma non è significativa: questo costituisce il primo aspetto da indagare. Per il caso a 50 bar, che fino al terzo livello di addestramento presentava un errore del 26,6 %, si osserva un miglioramento notevole: l'errore è sceso al 6,2 %. Questi aspetti possono essere riassunti con i grafici di Figura 47. I grafici rappresentano l'errore relativo tra i vettori colonna contenenti i profili provenienti dalla CFD e i vettori colonna contenenti i profili predetti dal meta-modello. Per ogni grafico, le icone a stella rappresentano i punti di addestramento, mentre le icone a pallino i punti di validazione. Queste ultime sono colorate in base all'errore relativo. L'intento del grafico è innanzitutto mettere in evidenza come, seppur il caso peggiore presenti un errore elevato, globalmente il set di validazione sia approssimato con errori minori del 13% (Figura 47 c).



Figura 47 – errore relativo sugli snapshot di validazione CFD per diversi livelli di addestramento (in ordine Livello 2, Livello 3, Livello 4).

Sempre osservando Figura 47 si vuole mettere in evidenza il vantaggio di aver utilizzato una griglia di addestramento adattiva. Infatti, passando dal Livello 2 di addestramento

(Figura 47 a), al livello 3 (Figura 47 b) e infine al livello 4 (Figura 47 c) si nota la progressiva diminuzione dell'errore.

A questo punto è importante indagare a fondo gli errori di approssimazione locali, principalmente per rispondere a due quesiti:

- 1) Le capacità predittive del meta-modello sono abbastanza accurate per una futura applicazione nell'ambito dell'analisi delle conseguenze?
- 2) Quali sono le modalità di utilizzo previste per questo strumento?

Al quesito di cui al punto 1) risponde il paragrafo 5.3, mentre al quesito di cui al punto 2) risponde il paragrafo 5.4.

Per comprendere la ragione per cui alla pressione di rilascio pari a 40 bar l'errore si mantenga alto, si scorpora l'errore relativo globale in errore locale, ovvero calcolato per ogni profilo (frazione massica, velocità lungo x, y e z) di ogni faccia (*lateral, back, front, up\_down*). Tramite questa analisi è possibile individuare quale superficie contribuisce maggiormente all'errore globale. Questa operazione si concentra sul profilo di velocità lungo x (direzione preferenziale del getto sottoespanso) e sulla concentrazione di metano.



Figura 48 – Errore relativo sui profili di concentrazione calcolato localmente per ogni superficie.

In Figura 48 è mostrata l'intensità dell'errore sui profili di concentrazione di ogni faccia della SB per tutti i casi di validazione. I "picchi" dell'errore si registrano per i punti di validazione più interni dello spazio dei parametri e in particolare sulla superficie *back* e *lateral* del caso peggiore ( $p_{ril} = 40$  bar). In Figura 49 si propongono due set di immagini per il caso a 40 bar: in alto sono rappresentate le mappe di errore relativo sulla frazione

massica di CH4 per le facce di *lateral* e *back*, mentre in basso si riportano i profili di concentrazione di CH4 provenienti dalla CFD. Osservando le immagini di Figura 49 è evidente che l'errore elevato sia causato da una problematica di tipo numerico. Spesso capita che la frazione massica su queste facce abbia un valore molto piccolo. Nel tentativo di calcolare un errore relativo, si incorre in una divisione per un valore prossimo allo 0. È facile comprendere che l'errore che ne deriva è molto elevato e contribuisce a peggiorare le prestazioni del meta-modello. Per queste facce pertanto, la difficoltà a livello numerico risiede nel definire una stima dell'errore che abbia senso. Nelle immagini sottostanti infatti, si nota che nelle mappe di errore relativo la faccia di lateral presenta degli errori quando in realtà la frazione massica sulla superficie è nulla.



Figura 49 – Mappe dell'errore relativo tra i profili di frazione massica di CH4 predetti dal ROM (in alto) e i profili prodotti dalla CFD per le superfici di *back* e *lateral* e contour di frazione massica provenienti dalla CFD (in basso).



Figura 50 – Errore relativo sui profili di velocità lungo x calcolato localmente per ogni superficie.

In Figura 50 si ripropone la tipologia di mappa utilizzata per scorporare l'errore globale in errore locale di Figura 49, ma stavolta per i profili di velocità lungo x. In questo caso a 40 bar si registrano errori elevati su tutte le superfici. Siccome le due superfici back e lateral non sono rilevanti quanto le superfici di up\_down e front e siccome contribuiscono pesantemente ad aumentare l'errore, si può valutare la possibilità di escludere queste due facce dalla modellazione impostando valori pari a zero di velocità e frazione massica.

Prima di effettuare qualsiasi ulteriore tentativo di riduzione dell'errore si cerca di capire se l'errore prodotto dal meta-modello sia accattabile ai fini delle analisi della trattazione. Non esiste un metodo globalmente valido per stabilire quale sia il grado di accuratezza da raggiungere, ogni caso infatti deve essere valutato separatamente. Nella presente trattazione, che si inserisce nel contesto dell'analisi del rischio, si è ritenuto opportuno valutare come l'errore di approssimazione del meta-modello influisca sul volume di infiammabile presente sulla piattaforma. Questa grandezza è fondamentale e necessaria per valutare le conseguenze di un possibile innesco o esplosione della miscela. Viene preso come riferimento lo scenario della dispersione, le cui simulazioni e i relativi risultati sono presentati nel prossimo paragrafo.

#### 5.3 Influenza dell'errore globale sulla fase di dispersione

Per comprendere quale errore sulle grandezze di output si genera a partire da un errore di approssimazione sul modello di rilascio, sono stati selezionati due casi: 1 per il quale il metamodello ha l'errore più basso (caso migliore), 1 per il quale il metamodello ha l'errore più alto (caso peggiore):

- CASO PEGGIORE: errore globale del 28,5 % corrispondente a pril=40 bar;
- CASO MIGLIORE: errore globale dello 0,29 % corrispondente a pril=20 bar.

Nel primo caso sono state effettuate tre simulazioni di dispersione: una utilizza i profili provenienti dalla CFD, una i profili approssimati dal ROM addestrato al livello 3 e una i profili approssimati dal ROM addestrato al livello 4. Nel secondo caso sono state effettuate due simulazioni di dispersione: una utilizza i profili provenienti dalla CFD, una i profili approssimati dal ROM. Le grandezze valutate a valle della dispersione sono la massa di metano riversata sul deck, la velocità sull'outlet, il volume di infiammabile e la massa di infiammabile.

La dispersione è studiata all'interno della piattaforma di riferimento di cui si è parlato nei capitoli introduttivi. Il piano considerato per simulare la fase di dispersione è il deck di produzione, dove si concentrano i sistemi di trattamento e separazione di olio, gas e acqua e i sistemi di sicurezza. In Figura 51 è possibile visualizzare il layout della piattaforma di riferimento, in cui in rosso è visibile la localizzazione della SB (quindi il punto in cui avviene il rilascio gassoso) e la direzione del vento. Il rilascio avviene in presenza di un vento alla velocità di 6 m/s inclinato rispetto alla piattaforma di 45°.



Figura 51 - Layout della piattaforma di riferimento e campo di moto del vento.

Il piano di produzione della piattaforma scelta presenta una lunghezza di 30m, una larghezza di 20m ed un'altezza di 5m. La SB occupa  $5 m^3$  all'interno del deck di produzione ed è centrata nel punto di rilascio, alle coordinate indicate in *Tabella 10 – coordinate del punto di rilascio all'interno della piattaforma* Tabella 10:

Posizione di rilascio			
х	-12.23	m	
у	1.5	m	
Z	7	m	

Tabella 10 - coordinate del punto di rilascio all'interno della piattaforma

Il software utilizzato per le simulazioni è sempre ANSYS Fluent. Nel caso della dispersione, a differenza del rilascio, è importante tenere da conto gli effetti di gravità in quanto essi predominano rispetto alle forze di inerzia. Il fluido inoltre può essere considerato incomprimibile. Per poter simulare queste condizioni sul solutore fluidodinamico è quindi necessario spuntare la voce *Gravity* e impostare un valore di accelerazione di gravità lungo y pari a -9.81 m/s. L'opzione di incomprimibilità è invece attivata di default selezionando la miscela aria-metano nell'equazione per il trasporto delle specie. Il modello di turbolenza utilizzato in queste simulazioni è il modello k- $\omega$  Standard e la griglia di calcolo adottata è la stessa per tutti i casi. In questo caso bisogna prestare attenzione alle condizioni al contorno, riassunte nella Tabella 11 e visibili in Figura 52.

Superficie geometrica	Condizione al contorno
Ostacoli	Wall
Inter-deck superiore	Wall
Inter-deck inferiore	Wall
Inlet	Velocity Inlet
Outlet	Pressure Outlet
Source Box	Velocity Inlet

Tabella 11 - Condizioni al contorno per il dominio di dispersione.



Figura 52 – Visualizzazione delle condizioni al contorno sul dominio del deck di produzione della piattaforma.

Per valutare i rischi connessi alla dispersione di una miscela infiammabile è necessario stabilire se i valori di concentrazione si trovano entro i limiti di infiammabilità e in che punti della piattaforma ciò avvenga. Per il gas naturale i limiti sono pari a:

- LFL (Lower Flammable Limit): 5% in massa molare;
- UFL (Upper Flammable Limit): 15 % in massa molare.

Osservando Tabella 12, il caso peggiore comporta una sottostima del volume e della massa infiammabile presente sulla piattaforma con un errore rispettivamente del 16,88 % e del 18,94%. Il meta-modello è quindi in grado di predire la possibilità di innesco della miscela, ma le conseguenze dell'ignizione potrebbero essere pericolosamente sottostimate. Non si può dire altrettanto invece per il caso migliore, dove gli errori sulle grandezze fondamentali sono pari al 3 %.

p <sub>ril</sub>	MODELLO	Massa CH4 [kg]	V_out [m/s]	Vol. inf [m3]	Massa inf. [kg]
	CFD	12,8443	2,6878	21,8609	0,8147
20 bar	ROM	13,0255	2,6936	21,1591	0,7901
	Errore [%]	1,4106	0,2151	3,2103	3,0200
40 bar	CFD	19,74878	2,79562	92,7859	3,6843
	ROM (liv.3)	18,42693	2,75722	77,1220	2,9864
	ROM (liv.4)	19,736	2,763	84,871	3,320
	err_rel_liv3	6,6933 %	1,3736 %	16,8818 %	18,9429 %
	err_rel_liv4	0,066 %	1,165 %	8,530 %	9,880 %

Tabella 12 - Errori relativi sulla stima delle grandezze fondamentali della fase di dispersione.

Osservando invece gli errori sul volume infiammabile generato dal meta-modello addestrato al livello 4, si può concludere che si siano ridotti dal 17 % all'8,5 %. Questo sicuramente costituisce un risultato sorprendente in quanto, solo con 9 punti di addestramento addizionali si è riusciti ad abbassare l'errore sotto il 10 %. Tuttavia, se da un lato il risultato è incoraggiante, dall'altro si tenga conto che si è pur sempre in presenza di un errore di sottostima e non di sovrastima. Si è quindi in una condizione per nulla cautelativa.

Per meglio comprendere l'importanza della sottostima analizzata, si vuole valutare come e quali ostacoli vengono investiti dal getto di GN nel caso peggiore. A tale scopo sono stati prodotti dei contour di concentrazione del gas sezionando la piattaforma con un piano XZ che passasse per la coordinata y corrispondente all'altezza della tubazione a cui avviene il rilascio (y=1.5 m). In Figura 53 sono riportati i contour menzionati per due casi: profili provenienti dalla CFD e dal meta-modello addestrato al terzo livello.



Figura 53 – contour di concentrazione di metano sul piano XZ che passa per la coordinata y = 1.5 m.

Si noti innanzitutto l'importanza del campo di moto del vento. Esso influenza fortemente la direzione in cui il GN si disperde all'interno della piattaforma. Questo fenomeno è ben approssimato anche nel caso delle condizioni al contorno fornite dal meta-modello. I contour sono comparati soprattutto facendo caso a come gli ostacoli sono lambiti dalla nube di gas. Comprendere quest'ultima questione è fondamentale per l'analisi di rischio in quanto durante la fase di progettazione di una piattaforma potrebbe fornire informazioni preziose in merito alla localizzazione dei sistemi di rilevazione di gas. Infatti si noti come, seppur la maggior parte dei componenti sia lambita in entrambe le casistiche, ci sono alcuni ostacoli (cerchiati in rosso in Figura 53) che nel caso del ROM (livello 3) sono attorniati da minor concentrazione di gas naturale. Tuttavia, i risultati provenienti dall'addestramento al livello 4 (Figura 54) mostrano dei contour molto più simili alla CFD.



Figura 54 – contour di concentrazione di metano sul piano XZ che passa per la coordinata y = 1.5 m.

Nell'ambito delle QRA di una piattaforma offshore, l'esperienza professionale trasmette che un'incertezza della massa infiammabile inferiore al 10-15 % può essere ritenuta accettabile. L'errore ottenuto a valle dell'addestramento al quarto livello infatti, è al di sotto del 10 % e, seppur costituisca una sottostima, è importante sottolineare che implementando nuovi set di adestramento ci si aspetta di vedere una diminuzione ulteriore dell'errore. In aggiunta, per sopperire alla problematica, si può sempre pensare di trovare una metodologia che permetta di porsi in una situazione cautelativa. In futuro per esempio, si potrebbe valutare la possibilità di maggiorare il risultato di massa e volume infiammabile coerentemente all'errore di sottostima compiuto dal meta-modello.

#### 5.4 Libreria di SB o impiego real time?

Spesso nel corso della trattazione si è fatto riferimento alle diverse tipologie di impiego del meta-modello. Esso può essere utilizzato come tool per popolare una libreria di SB in modo che l'analista, in base alle specifiche esigenze, possa attingere al catalogo prelevando i profili di velocità e di concentrazione per simulare la fase di dispersione. L'altra opzione invece riguarda la possibilità di impiego "in diretta", ovvero all'occorrenza. In questa modalità l'analista non deve consultare un catalogo, ma unicamente inserire i dati di input della fase di rilascio (diametro del foro di rottura, pressione di stoccaggio del gas, distanza dell'ostacolo dall'ugello e diametro dell'ostacolo). In questo paragrafo, anche in base ai risultati ottenuti, ci si prefigge di analizzare i pro e i contro delle due modalità di utilizzo. Le valutazioni sono effettuate tenendo in considerazione i seguenti aspetti: tempistiche, praticità di utilizzo e flessibilità. In Figura 55 è presente uno schema il cui intento è quello di illustrare i pro e i contro delle modalità di applicazione del meta-modello.

Features	Catalogo di SB	Impiego real time
💁 Tempo	••••	••••
🕮 Praticità	••••	••••
🔗 Flessibilità	••••	••••

Figura 55 – Immagine riassuntiva dei pro e contro delle modalità di utilizzo.

La modalità *real time* presenta diversi vantaggi. Innanzitutto, dal punto di vista della praticità di utilizzo, l'inserimento dei dati di input nel meta-modello è una procedura facile e veloce da attuare. L'analista del rischio dovrà avviare il codice e, tramite una interfaccia di input, gli sarà richiesto di inserire i parametri che caratterizzano il suo particolare rilascio. Allo stato dell'arte, quindi con uno spazio dei parametri a una sola dimensione, non si comprende il vantaggio e l'agevolezza del dover solo inserire dei dati. Per questo motivo ci si ponga nell'ottica di usare un meta-modello con uno spazio dei parametri di fori di rottura, pressioni di rilascio e dimensioni dell'ostacolo. La procedura di inserimento degli input è molto più agevole che consultare una libreria contenente numerose casistiche.

Per quanto riguarda l'aspetto di flessibilità e versatilità, l'utilizzo real time consentirebbe all'analista di rischio di inserire esattamente i dati del suo rilascio, senza essere vincolato alle casistiche precedentemente simulate e inserite all'interno di un catalogo. A questo aspetto si somma la seguente considerazione. Il meta-modello è uno strumento caratterizzato dall'essere adattivo, ovvero di poter ridurre l'errore senza la necessità di ripartire da zero. Il mancato vincolo a un catalogo consentirebbe di continuarne a migliorare le prestazioni nel tempo.

Un ulteriore punto che gioca a vantaggio della modalità *real time*, risiede nell'esiguo tempo con cui il meta-modello processa i risultati. In pochi minuti infatti, il ROM è in grado di ricostruire le interpolazioni fra i numerosi casi di addestramento e di fornire in output i profili di velocità e concentrazione richiesti.

Per quanto riguarda la modalità di **popolamento della libreria** di SB invece, il vantaggio risiede nell'essere in possesso di un oggetto pronto all'uso. Questo aspetto sicuramente gioca a vantaggio delle tempistiche impiegate per consultarla e per trovare il caso specifico.

D'altro canto, gli svantaggi risiedono nel fatto che il meta-modello è uno strumento con grandi potenzialità, tra cui quella di poter essere migliorato implementando nuovi training set. Se volessimo utilizzare una libreria, dovremmo ripopolarla ogni qual volta si decidesse di ridurre l'errore del meta-modello. Risulterebbe una azione estremamente onerosa. Non solo, se si decidesse di utilizzare uno spazio dei parametri a più dimensioni, anche in questo caso dovrebbe essere ripopolata e riprogettata per consentirne una rapida lettura.

Un ulteriore svantaggio di questa applicazione risiede nella difficoltà di racchiudere al suo interno la molteplicità di casistiche esistenti. I profili prelevati dalle superfici di output della SB sono molto sensibili alla forma dell'ostacolo, alle dimensioni dell'ostacolo e alla distanza che questo ha rispetto alla sorgente di rilascio. Simulare a priori un numero sufficiente di scenari richiede uno sforzo non solo computazionale, ma anche di natura fenomenologica. Infatti, in base ai parametri di input i fenomeni fisici che entrano in gioco sono differenti e imprevedibili data la natura della turbolenza, fenomeno che predomina in questa prima fase di rilascio. Come si è visto, basti pensare ai vortici che si formano sulla parete della tubazione. Essi potrebbero costituire uno scenario ben peggiore dei casi a 1 cm. Per questo motivo bisognerebbe indagare anche fisicamente gli altri scenari. Per fare fronte a questo inconveniente tuttavia, si potrebbe pensare di trovare un modo per correlare fra loro i vari parametri legati agli ostacoli, cercando quindi di capire se i fenomeni fisici che si verificano sono riconducibili a certi fattori comuni.

### Conclusioni e Sviluppi futuri

Il contributo che la presente trattazione vuole apportare all'ambito della modellazione delle conseguenze è quello di utilizzare uno strumento che, seppur ampiamente studiato in campo ingegneristico, allo stato dell'arte non trova impiego nel settore dell'analisi del rischio. In effetti la riduzione dell'ordine di un modello dev'essere eseguita con cautela, specialmente se esso è preposto alla stima delle quantità di infiammabile all'interno di una piattaforma.

Dalle analisi svolte si evince quanto lo strumento sia promettente: sia per il potenziale di ridurre drasticamente le dispendiose tempistiche della CFD, sia per le capacità di predizione associate al particolare evento di rilascio incidentale. Infatti, con un errore di approssimazione globale prossimo al 30 % si ottiene un errore sulla stima di infiammabile dapprima del 17 %, poi, continuando ad addestrare il meta-modello la stima migliora e l'errore si abbassa fino all' 8 %. Questi ultimi risultati sono in linea con gli errori che spesso si compiono utilizzando modelli di matrice prescrittiva. Tuttavia, a differenza dei modelli prescrittivi, gli errori compiuti dal meta-modello costituiscono una sottostima delle grandezze in gioco e non una sovrastima. Siccome si sta valutando di utilizzare il metamodello in fase di design delle piattaforme, quindi nella fase in cui si determina anche quali sistemi di sicurezza adottare e dove localizzarli, sarebbe importante riuscire a porsi in una situazione cautelativa e non viceversa. Una soluzione alla problematica della sottostima potrebbe risiedere nel valutare l'errore globale più alto di approssimazione del metamodello e pensare di maggiorarlo durante la fase di analisi del rischio. In questo modo basterebbe effettuare la fase di dispersione applicando le condizioni al contorno del ROM, valutare le grandezze d'interesse (volume infiammabile) e a tale valore aggiungere la quota legata all'errore del meta-modello. Se da un lato questa soluzione consente di essere cautelativi, dall'altro presenta il grande svantaggio che l'errore più alto trovato non è detto sia in assoluto l'errore di approssimazione più alto che il metamodello possa produrre all'interno dello spazio dei parametri. Questo aspetto si amplifica quanto più accrescono le dimensioni dello spazio dei parametri.

Pertanto, con questa trattazione sono state poste le basi per comprendere la fattibilità del progetto e per delineare le modalità di impiego del meta-modello. L'impiego *real time* presenta molti vantaggi e tra i più importanti figurano la possibilità di sfruttare la caratteristica di adattività del meta-modello e di simulare esattamente lo stesso scenario critico selezionato durante la fase di PHA dall'analista del rischio. La libreria di SB invece, per quanto costituisca un elemento pronto all'uso, appare di difficile realizzazione per via dei vincoli che imporrebbe all'utilizzo del meta-modello e dei numerosi casi che dovrebbe contenere. Quest'ultimo aspetto è soprattutto legato all'ampio ventaglio di fenomeni fisici che si generano nella fase di rilascio cambiando anche di poco un parametro. Le considerazioni fino a qui formulate quindi, portano a concludere che l'applicazione più promettente riguardi l'utilizzo in diretta del meta-modello.

È importante sottolineare che, seppur sussistano le basi per una futura applicazione dello strumento nell'analisi del rischio, i miglioramenti da apportare al meta-modello sono ancora molteplici.

Gli sviluppi futuri che potrebbero scaturire dal presente lavoro di tesi riguardano sia il fronte della CFD che il fronte del modello ad essa surrogato. Innanzitutto, sarebbe interessante approfondire la questione dei vortici che risalgono il cilindro. Lo scopo non risiede tanto nel migliorare le capacità di predizione del meta-modello, quanto nel poterlo addestrare con simulazioni rappresentative del reale fenomeno fisico in gioco. Per queste ragioni bisognerebbe porre l'attenzione su come tali vortici evolvono variando la posizione dell'ostacolo rispetto alla sorgente di rilascio, la dimensione dell'ostacolo e il diametro del foro di rottura. Infatti, nell'ottica di simulare un foro da 5 cm, ci si aspetta che questo fenomeno venga addirittura amplificato, considerate le alte concentrazioni di gas rilasciate.

Sul fronte meta-modello invece, è consigliabile innanzitutto cercare di ridurre l'errore di sottostima aumentando i punti di addestramento utili al meta-modello per creare delle interpolazioni quanto più accurate possibile. Questa operazione può essere svolta o andando a infittire le regioni dello spazio dei parametri coperte da pochi punti di addestramento o scegliendo in maniera oculata i set di addestramento e validazione. In questa trattazione i set di validazione e di addestramento sono stati prestabiliti prima di svolgere le simulazioni. Tuttavia, dopo una attenta analisi si può pensare di rendere alcuni tra i punti di validazione e addestramento intercambiabili. Infatti, se un punto preposto per l'addestramento si trova in prossimità di un altro punto di addestramento, può essere utilizzato per validare il meta-modello. Al contrario, i punti di validazione localizzati in una regione poco infittita possono essere utilizzati per addestrare il meta-modello. In più, sempre al fine di ridurre l'errore, bisogna capire come non conteggiare gli errori derivanti dalle facce di *back* e *lateral*, in quanto la natura di tali errori è prettamente numerica.

Infine, sarebbe molto più efficace validare il modello su uno spazio dei parametri a più dimensioni (diametro del foro di rottura, pressione di rilascio, distanza dell'ostacolo dal foro di rilascio, etc), in modo da rendere l'algoritmo di Smolyak più efficace e il metamodello più flessibile per lo scopo da noi perseguito. Il passo che bisogna compiere in questa direzione non riguarda tanto l'adeguamento del codice a uno spazio dei parametri multidimensionale, quanto l'oneroso sforzo computazionale per mappare tutte le differenti casistiche.

#### **Bibliografia**

- [1] Exxon Mobil Corporation, «Outlook for Energy: a perspective to 2040,» United States of America, 2019.
- [2] IEA, «World Energy Outlook 2020,» Ottobre 2020.
- [3] «American Petroleum Institute,» [Online]. Available: https://www.api.org/oil-andnatural-gas/wells-to-consumer/exploration-and-production/offshore/offshoreproduction-facilities.
- [4] F. Pallavicini, «Sviluppo di giacimenti in mare,» Treccani, San Giuliano Milanese, Milano.
- [5] R. Gerboni, «Appunti di Uso ottimale e sicurezza degli impianti energetici,» 2018.
- [6] «Ministero dello sviluppo economico,» [Online]. Available: https://unmig.mise.gov.it/index.php/it/dati/ricerca-e-coltivazione-di-idrocarburi.
- [7] «Ministero dello Sviluppo Economico,» [Online]. Available: https://unmig.mise.gov.it/images/dati/produzione-2020.pdf.
- [8] M. d. S. Economico-DSG-UNMIG, «Piattaforme marine e strutture assimilabili,» 2020.
- [9] «Ministero dello Sviluppo economico,» [Online]. Available: https://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html?webmap=44a7f3d8c5db49369f772 098b33dff2e&extent=9.1075,42.426,17.2209,45.8771.
- [10] C. Vivalda, R. Gerboni e A. Carpignano, «A practical approach to risk-based gas monitoring system design for oil and gas offshore platforms,» *Probabilistic Safety Assessment and Management PSAM 14, Los Angeles, CA,* Settembre 2018.
- [11] «Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare,» [Online]. Available: https://www.minambiente.it/pagina/la-direttiva-seveso-iii-decreto-legislativo-26-giugno-2015-ndeg105.
- [12] «Ministero dello Sviluppo Economico,» [Online]. Available: https://unmig.mise.gov.it/index.php/it/sicurezza/sicurezza-delle-attivita-e-tutelaambientale/direttiva-2013-30-ue.
- [13] «Politecnico di Torino,» [Online]. Available: http://www.politocomunica.polito.it/content/download/5192/33194/file/Comunicato%.
- [14] N. Pedroni, Appunti del corso di Risk Analysis, a.a. 2019/2020.
- [15] J. Spouge, «A Guide To Quantitative Risk Assessment for Offshore Installations,» 1999.

- [16] X. Meng, G. Chen, G. Zhu e Y. Zhu, «Dynamic quantitative risk assessment of accidents induced by leakage on offshore platforms using DEMATEL-BN,» *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, vol. 11, pp. 22-32, Gennario 2019.
- [17] D. C. Wilcox, Turbulent Modeling for CFD, California, Novembre 2006.
- [18] J. H. Ferziger e M. Peric, Computational Methods for fluid dynamics, Springer.
- [19] R. Zanino, *Appunti del corso Computational thermal fluid dynamics*, Politecnico di Torino, a.a. 2018/2019.
- [20] G. Ledda, «Modello CFD di rilasci di gas compresso: analisi di sensitività dei parametri caratteristici,» Politecnico di Torino, 2019.
- [21] A. Moscatello, «Modellazione CFD di rilasci incidentali di gas infiammabili e tossici in piattaforme Oil & Gas,» Politecnico di Torino, 2018.
- [22] C. Rupolo, *Modellazione CFD del rilascio di gas compressi in ambiente off-shore: source boxes,* Politecnico di Torino, (2018).
- [23] T. Corti, «CFD modelling of accidental events in oil&gas environment: definition of a source box,» Politecnico di Torino.
- [24] W. H. A. Schilders e H. A. v. d. V. Rommes, Introduction to Model Order Reduction, Springer, Gennaio 2018.
- [25] A. Quarteroni e A. Veneziani, «Analysis of a geometrical multiscale model based on the coupling of PDE's and ODE's for blood flow simulations,» SIAM J. on MMS, pp. 173-195, 2003.
- [26] T. Lassila, A. Manzoni, A. Quarteroni e G. Rozza, Model Order Reduction in Fluid Dynamics: Challenges and perspectives, 2014.
- [27] S. D. N. P. N.Abrate, «A Non-Intrusive Reduced Order Model for Light Water Reactor core stability analysis,» Giugno 2020.
- [28] J. D. Anderson, Fundamentals of Aerodynamics, University of Maryland: McGraw-Hill Series in Aeronautical and Aerospace Engineering, 1991.
- [29] F. Mallamo, «Moto degli Aeriformi nei Condotti. Slides del modulo di macchine corso di laurea a distanza in Ingegneria Meccanica».
- [30] E. Franquet, V. Perrier, S. Gibout e P. Bruel, «Free underexpanded jets in a quiescent medium: A review,» *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 77, pp. 25-53, Settembre 2015.
- [31] S. Crist, P. M. Sherman e D. R. Glass, «Study of the Highly Underexpanded Sonic Jet,» AIAA Journal, vol. 4, n. 1, Gennaio 1966.
- [32] A. N. T. C. Adamson: JR, «On the structure of jets from highly underexpanded nozzles into still air,» *Journal of the aero/space sciences,* Gennaio 1959.

- [33] A. L. Addy, «Effects of axisymmetric sonic nozzle geometry on Mach disk characteristics,» *AIAA Journal*, vol. 19, n. 1, 1981.
- [34] A. Carpignano, T. Corti, A. Uggenti e R. Gerboni, «Modelling of a supersonic accidental release in Oil & Gas offshore: characterisation of a Source Box».
- [35] M. J. Stephens, K. Leewis e D. K. Moore, «A model for sizing high consequence areas associated with natural gas pipelines.,» in *Proc. 4th International Pipeline Conference*, 2002.
- [36] F. F. C. P. I. N. D. Xiao, «A parameterized non-intrusive reduced order model and error analysis for general time-dependent nonlinear partial differential equations and its applications,» *Comput. Methods Appl. Mech. Engineering*, vol. 317, pp. 868-889, 2017.
- [37] P. Masarati, «Dynamics and Control of Flexible Aircraft,» *Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale, Politecnico di Milano,* Giugno 2020.
- [38] E. Maffia, «Applicazione di meta-modelli a supporto della simulazione CFD di rilasci incidentali in ambito Oil & Gas,» Politecnico di Torino, 2019/2020.
- [39] «OGP. Risk Assessment Data Directory. Report 434-4 Process release frequencies, (2019)».
- [40] E. Pederiva, Towards the CFD simulation of accidents on off-shore platforms: dispersion of a turbulent jet hitting a cylinder.
- [41] ANSYS Fluent manuale d'uso..
- P. Birkby e G. Page, «Numerical predictions of turbulent underexpanded sonic jets using a pressure-based methodology,» *Journal of Aerospace Engineering*, vol. 215, pp. 165-173, 2001.
- [43] F. R. Menter, «Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications,» AIAA Journal, vol. 32, n. 8, pp. 1598-1605, 1994.

## **APPENDICE A – Norma Infinito**

SUPERFICIE: BACK				
p <sub>ril</sub> [bar]	x-vel [%]	y-vel [%]	z-vel [%]	ch4 [%]
20	47,14	8,45	7,33	0,01
30	20849,19	101,49	13,55	1,63
40	29934,69	338,03	42,74	30,19
50	12859,30	411,65	705,78	4,63
60	1235,08	1254,57	1187,71	2,12
70	413,58	226,32	1069,35	2,19

SUPERFICIE: FRONT				
p <sub>ril</sub> [bar]	x-vel [%]	y-vel [%]	z-vel [%]	ch4 [%]
20	30,26	10,39	18,02	0,41
30	930,05	244,85	104,03	1,35
40	1859,33	778,03	241,53	3,33
50	3698,60	436,29	426,27	5,03
60	1145,85	182,87	133,75	1,63
70	1921,55	331,06	483,07	0,62

SUPERFICIE: LATERAL				
p <sub>ril</sub> [bar]	x-vel [%]	y-vel [%]	z-vel [%]	ch4 [%]
20	3,45	3,74	7,33	0,00
30	3,54	0,74	17,90	0,00
40	14,06	5,08	47,59	0,00
50	17,59	5,42	114,24	0,00
60	8,74	6,31	41,19	0,00
70	24,89	3,82	196,44	0,00

SUPERFICIE: UPDOWN				
p <sub>ril</sub> [bar]	x-vel [%]	y-vel [%]	z-vel [%]	ch4 [%]
20	15,56	38,01	7,96	0,07
30	448,33	475,91	50,49	1,48
40	1213,81	838,53	180,04	4,01
50	842,78	4651,25	429,39	4,45
60	374,26	1360,18	165,59	1,51
70	480,14	729,63	128,45	1,37

# **APPENDICE B – Norma Euclidea parziale**

	SUPERFICIE: BACK				
p <sub>ril</sub> [bar]	x-vel [%]	y-vel [%]	z-vel [%]	ch4 [%]	
20	0,14	3,16	34,94	0,01	
30	33,07	15,88	15,99	2,31	
40	42,21	52,81	41,24	27,13	
50	23,88	65,80	89,93	6,38	
60	2,92	100,21	98,80	2,07	
70	1,24	38,21	305,88	2,28	

SUPERFICIE: FRONT				
p <sub>ril</sub> [bar]	x-vel [%]	y-vel [%]	z-vel [%]	ch4 [%]
20	0,23	0,54	4,38	0,69
30	8,49	6,84	50,89	6,79
40	20,49	37,71	113,92	19,11
50	28,67	26,36	119,97	25,96
60	8,07	6,60	33,27	7,90
70	15,45	55,47	44,51	1,77

SUPERFICIE: LATERAL						
p <sub>ril</sub> [bar]	x-vel [%]	y-vel [%]	z-vel [%]	ch4 [%]		
20	11,23	13,81	0,54	NaN		
30	11,22	4,16	2,93	NaN		
40	39,23	25,39	6,30	NaN		
50	48,32	18,39	21,30	NaN		
60	18,06	14,25	6,57	NaN		
70	15,20	8,31	13,32	NaN		

SUPERFICIE: UPDOWN						
p <sub>ril</sub> [bar]	x-vel [%]	y-vel [%]	z-vel [%]	ch4 [%]		
20	0,31	0,37	0,88	0,34		
30	9,49	8,93	6,38	6,18		
40	32,35	18,53	19,15	27,74		
50	16,36	20,10	36,82	14,79		
60	4,74	5,61	11,02	4,27		
70	6,20	3,28	8,63	3,95		