

POLITECNICO DI TORINO

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Energetica e Nucleare**

Tesi di Laurea Magistrale

Modello CFD di rilasci di gas compresso: analisi di sensitività dei parametri caratteristici



Relatori

prof. Andrea Carpignano
prof.ssa Raffaella Gerboni
dott.ssa Anna Chiara Uggenti

Candidato

Gianmario Ledda

Ottobre 2019

Abstract

The industrial sector is a fundamental part of the productive activities around the world. This is an area in continuous technological growth and this development is driven by an attention to industrial safety and sustainable development consistent with increasingly current environmental problems. For this reason, today we are faced with restrictive regulatory requirements that constrain a continuous technological innovation.

Dangerous chemical substances are involved every day in a multitude of industrial applications, they can be a resource due to the technological role, but they can also be a source of risk, in fact they could cause catastrophic accident scenarios for people and the environment, for these reasons special attention must be used to the prevention and mitigation of a possible incidental scenario. Thanks to the actual perception, the risk assessment analysis of an incidental scenario is now fully integrated tools in the design phase of many industrial applications.

The aim of the work is to improve a model for identifying the areas of damage due to the release of a dangerous gaseous substance in a congested industrial environment. The case study examined takes into account an accidental release of methane gas from a pressurized pipeline present in the production plan of an Oil & Gas platform in an off-shore environment.

The model was formulated using computational fluid dynamics with an innovative approach called "Two-Steps". It was decided not to simulate the entire scenario through a single simulation but to separate the phenomenon into two distinct steps and model it using two different methods. The reason is a significant physical differences that are evident between the first phase, called release and the second phase, called dispersion. In fact, in the first phase, there are strong compressibility phenomena that involve the adoption of physical and numerical assumptions not necessary for the second phase in which the fluid is considered incompressible. Consequently, the first step is modelled in a domain called "Source Box", this domain acts as an input for the second phase which will then lead to the identification of the damage areas. The target of the project, in which this thesis is inserted, is to promote the use of the "Two-Steps" approach considered most faithful to the modelling of the phenomenon, the creation of a Source Box library and the full understanding of how the various input parameters affect the release phase.

During this study, it was therefore investigated how the various geometric and physical parameters of the Source Box could influence the phenomenon. Subsequently, it was made a study to reduce the number of cases that must be studied, achieving important results.

This work is part of a project financed by the Ministry of Economic Development. The work has been developed at the SEADOG laboratory (Safety & Environmental Analysis Division for Oil & Gas) of the Politecnico di Torino.

Il comparto industriale è una fetta fondamentale delle attività produttive della società. Si tratta di un ambito in continua crescita tecnologica e questo sviluppo è guidato in maniera prevalente dall'attenzione alla sicurezza industriale e ad uno sviluppo sostenibile e in armonia con le problematiche ambientali sempre più attuali. Per questo motivo oggi ci troviamo davanti a requisiti normativi sempre più restrittivi che richiedono una continua innovazione tecnologica. All'interno di una moltitudine di applicazioni industriali sono coinvolte ogni giorno sostanze chimiche pericolose; queste, oltre che essere una risorsa per il ruolo tecnologico che svolgono, possono essere anche fonte di rischio: infatti, potrebbero determinare scenari incidentali catastrofici per persone e ambiente, per questo motivo è necessario una attenzione particolare alle fasi di prevenzione e mitigazione di un possibile scenario incidentale. Grazie a questa odierna sensibilità, la valutazione del rischio di uno scenario incidentale e delle conseguenze che possono scaturirne è ormai uno strumento integrato pienamente nella fase di design di molte applicazioni industriali.

Questo lavoro nasce dall'esigenza di creare un modello adatto a identificare le aree di danno dovute al rilascio di una sostanza gassosa pericolosa in un ambiente congestionato in ambito industriale. Il caso studio preso in esame prende in considerazione un rilascio incidentale di gas metano tramite una tubatura sottoposta a pressurizzazione presente nel piano di produzione di una piattaforma Oil & Gas in ambiente off-shore.

Il modello prescelto è stato formulato utilizzando la fluidodinamica computazionale con un innovativo approccio detto "Two-Steps". Ovvero si è deciso di non simulare l'intero scenario tramite una sola simulazione ma di separare il fenomeno in due distinte fasi e modellarlo tramite due diverse procedure. Questa scelta è dettata dalle significative differenze fisiche che si evidenziano tra la prima fase, detta di rilascio e la seconda fase, detta di dispersione. Infatti, nella prima fase sono presenti forti fenomeni di comprimibilità che comportano l'adozione di assunzioni fisiche e numeriche non necessarie per la seconda fase in cui il fluido è considerato incomprimibile. Il primo step dell'approccio è modellato all'interno di un dominio detto "Source Box: questo dominio funge da input per la seconda fase che poi porterà all'identificazione delle aree di danno. Sono obiettivi del progetto in cui è inserita questa tesi promuovere l'uso dell'approccio "Two-Steps" ritenuto fedele alla modellazione del fenomeno, la creazione di una libreria di Source Box adatte all'opportuna esigenza di chi si trova a dover effettuare un'analisi di rischio e la piena comprensione di come influiscono i vari parametri di input nella fase di rilascio.

Durante questo studio si è dunque indagato come i vari parametri geometrici e fisici della Source Box potessero influire sul fenomeno in modo da identificare una strategia per correlare le grandezze necessarie alla fase di dispersione con questi parametri. Successivamente si è cercato un modo per ridurre il numero di casi da studiare, raggiungendo dei risultati importanti. Il lavoro è inserito all'interno di un progetto finanziato dal Ministero dello Sviluppo Economico ed è stato svolto presso il laboratorio SEADOG (Safety & Environmental Analysis Division for Oil & Gas) del Politecnico di Torino.

Sommario

1.	Introduzione	2
1.1	Quadro normativo	4
1.1.1	Direttiva 2012/18/UE o Direttiva Seveso III.....	4
1.1.2	Direttiva 2013/30/UE e D.Lgs 145/2015	7
1.2	Attività di ricerca in ambito offshore	8
1.3	CFD	11
1.4	Obiettivi della tesi	12
1.5	Struttura tesi	13
2.	Teoria	14
2.1	Formulazione matematica	14
2.1.1	Equazioni di Navier-Stokes.....	14
2.1.2	Fluidi comprimibili	15
2.1.3	Interazione fluido ostacolo	20
2.2	Getti turbolenti sottoespansi.....	20
2.2.2	Struttura del getto	21
2.3	Rilasci incidentali in ambito industriale.....	24
3.	Metodologia	27
3.1	Caso studio e modelli numerici.....	27
3.1.1	Source box.....	29
3.1.2	Coupling e dispersione	30
3.1.3	Solver fluidodinamico	31
3.2	Cenni ai lavori passati	31
3.3	Parametro A e nuove proposte	32
3.4	Simulazione 2D.....	34
3.4.1	Geometria	34
3.4.2	Mesh o griglia di calcolo	34
3.4.3	Setup di Fluent	37
3.4.5	Studio di grid independence in geometria 2D.....	42
3.5	Simulazione 3D.....	47
3.5.1	Geometria	47
3.5.2	Mesh o griglia di calcolo	48
3.5.3	Setup di Fluent	49
3.4.5	Studio di grid independence.....	53
4.	Risultati.....	57
4.1	Consistenza fisica della soluzione.....	57
4.1.1	Caso in due dimensioni	57
4.1.2	Caso in tre dimensioni.....	59
4.2	Studio dei 3 fattori.....	60
4.3	Studio dei 2 fattori.....	62
4.3.1	Caso bidimensionale	62
4.3.2	Caso tridimensionale	68
4.4	Studio al variare del rapporto l/d.....	73
4.5	Analisi dei profili spaziali	76
4.6	Studio al variare delle pressioni di stoccaggio	82
5.	Conclusioni.....	88
	Bibliografia.....	Errore. Il segnalibro non è definito.
	Bibliografia.....	90

1. Introduzione

Dall'inizio del XXI secolo l'economia dell'Europa ha subito una svolta radicale, comportando un cambiamento radicale nella società occidentale che oggi è possibile osservare. L'Europa odierna si sta attestando in questi anni come il maggior operatore nel settore terziario dei servizi. Ad oggi i lavoratori impiegati nel settore terziario rappresentano il 74% dell'occupazione totale, rispetto al 66 di inizio anni 2000 [1]. In parallelo il settore industriale ha invece subito un'inflexione occupazionale, acuitasi dopo la crisi finanziaria del 2008 e si attesta nell'ultimo decennio ad essere tra il 20% e il 25% del mercato occupazionale.



Figura 1.1: Andamento occupazionale in UE e Italia [4].

Mentre il valore aggiunto lordo ha subito anche esso un calo ma meno brusco e ancora oggi il settore secondario ricopre stabilmente circa un quarto del PIL europeo, rimanendo quindi un settore imprescindibile della nostra economia.

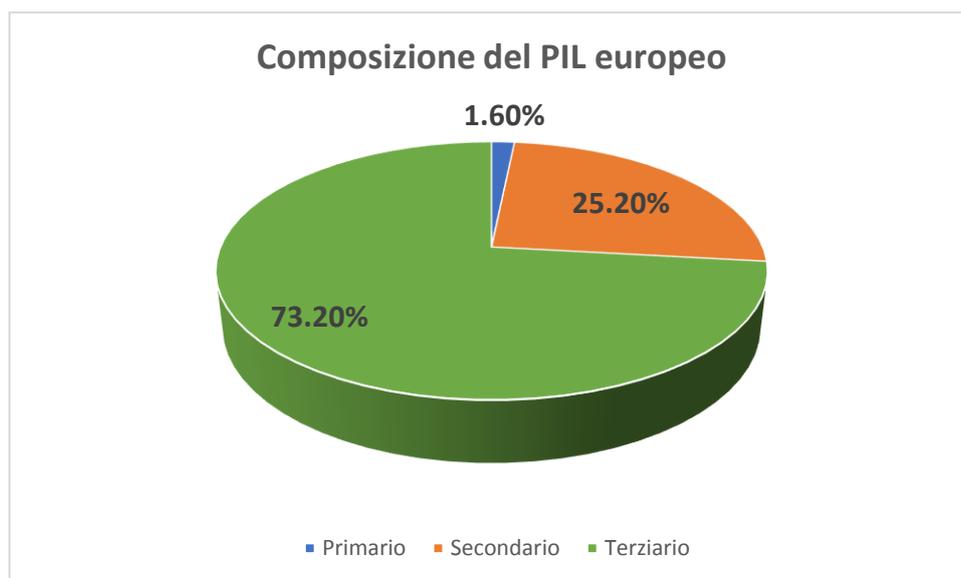


Figura 1.2: Composizione del PIL europeo [2].

L'Italia, che ricopre il ruolo di terza economia dell'area euro, ha inevitabilmente seguito questi trend che attesta il suo reparto industriale intono al 24-25% del PIL, mantenendo però un livello occupazionale del settore industriale leggermente più alto della media europea (**Fig.1**).



Figura 1.3: Composizione del PIL italiano [2].

All'interno del settore secondario ricopre un ruolo predominante l'industria di processo, composta dall'industria estrattiva, dall'industria manifatturiera e dall'industria energetica [3] e rappresenta ancora oggi il presente e il futuro di una parte sostanziale del settore economico occidentale.

All'interno del comparto industriale è imprescindibile a livello tecnologico l'uso di sostanze gassose; l'utilizzo di queste sostanze spazia dal settore dell'industria alimentare a quello dell'industria siderurgica passando per il settore energetico, metallurgico e minerario solo per citare i più importanti.

Per gas si intende una sostanza chimica in stato gassoso a pressione atmosferica e in un range di temperatura tra 0 K e 293.15 K. Con il termine gas industriali si indicano sostanze gassose combustibili e non, finalizzate all'uso nel settore secondario. Quello inerente a questo tipo di sostanze è un mercato in forte crescita in quanto si stima un comparto che nel 2017 si è attestato intorno ai 70 miliardi di USD e punta ad avere un volume d'affari di circa 100 miliardi di USD nel 2023 [5].

Questa tesi si occuperà di contribuire allo sviluppo di un modello fluidodinamico computazionale da utilizzare per una sottocategoria operativa di gas industriali, ovvero i gas pressurizzati.

I gas pressurizzati o compressi sono sostanze in fase gassosa in condizioni standard solitamente stoccati a pressioni maggiori di quella ambiente. Questi possono essere suddivisi in due macrocategorie, gas non liquefatti e gas liquefatti. I primi rimangono in fase gassosa a temperatura ambiente al di là di qualsiasi pressione venga applicata, naturalmente questi composti possono essere liquefatti se raffreddati ad una temperatura minore della propria temperatura di ebollizione.

Mentre i gas liquefatti passano in fase liquida se stoccati in contenitori a temperatura ambiente ma pressione maggiore della pressione ambiente.

Queste sostanze possono avere le più svariate applicazioni in ambito industriale. Possiamo ritrovare i gas combustibili che sono identificati per lo più dalla famiglia degli idrocarburi, questi sono sfruttati per la produzione di calore in impianti termoelettrici, per la produzione di

sostanze più raffinate mirate al campo della propulsione o all'utilizzo in campo domestico. Gli idrocarburi sono solitamente pressurizzati sia nel momento della loro estrazione dal sottosuolo sia durante il loro stoccaggio sino all'uso finale. Abbiamo poi i gas usati come refrigeranti, di cui fanno parte per lo più i gas liquefatti per pressione in quanto sono in grado di assorbire una grossa quantità di calore. Di questa categoria fanno parte per lo più gli idrocarburi alogenati, ma vengono classificati come refrigeranti anche altre sostanze usate per altre applicazioni come il metano o l'azoto. Ci sono poi alcuni gas come l'ossigeno, l'idrogeno o i gas inerti che presentano ruoli nelle più diverse applicazioni industriali.

Ognuno di questi gas rappresenta oltre ad una risorsa anche una possibile fonte di pericolo all'interno dell'ambito industriale. In quanto, tutti i gas possono agire come semplici asfissianti ed è dunque necessario che sia presente una adeguata ventilazione per prevenire il pericolo nei locali in cui sono presenti. Alcuni gas possono avere un effetto tossico sull'uomo per inalazione o per contatto con pelle e occhi dovuto all'alta concentrazione di vapori. Ci sono poi i gas liquefatti e i gas criogenici che possono essere tossici o essere pericolosi a causa delle loro temperature, in quanto una rapida esposizione a queste temperature può danneggiare organi molto sensibili come gli occhi oppure una esposizione prolungata può danneggiare la pelle causando bruciature da freddo o ipotermia [6]. Molti gas possono essere infiammabili o altamente infiammabili e di conseguenza comportare possibilità di incendi o esplosioni, per questo motivo è necessario prendere delle precauzioni per individuare le possibilità di rilasci incidentali e per evitare qualsiasi fonte di innesco. All'interno di questa categoria diventa di particolare interesse il ruolo dell'ossigeno atmosferico o puro, in quanto questo gas non dà vita a combustione come sostanza pura, ma la sua presenza all'interno di una miscela con altri gas abbassa il punto di infiammabilità di questi ultimi e velocizza la reazione.

A cause di queste caratteristiche nasce la necessità di regolamentare a livello legislativo l'utilizzo di queste sostanze.

1.1 Quadro normativo

A seguito di quanto detto è necessario dare una visione generale del quadro normativo che regola le possibili operazioni in questo campo applicativo. Le normative che riguardano il nostro settore di interesse sono la direttiva europea 2012/18/UE relativa al controllo del pericolo di incidenti rilevanti connessi con sostanze pericolose e la direttiva 2013/30/UE sulla sicurezza in mare nel settore degli idrocarburi.

1.1.1 Direttiva 2012/18/UE o Direttiva Seveso III

La direttiva Seveso III nasce dalla volontà dei vari paesi membri dell'Unione Europea di proteggersi da grandi incidenti industriali dovuti a sostanze pericolose. Questa direttiva prende il nome dall'incidente di Seveso del 10/07/1976 dove ci fu la fuoriuscita di una nube tossica dall'azienda ICMESA con sede a Meda di una diossina chiamata Tetracloro-dibenzo-diossina (TCDD). Questa nube investì alcuni comuni della bassa Brianza tra cui in particolare il comune di Seveso.



Figura 1.4: Cartello di pericolo presente nell'area colpita dall'incidente di Seveso [7].

Da questo incidente nacque la prima direttiva comunitaria, ovvero la direttiva CEE 82/501 detta anche Seveso I. La norma si è evoluta nel tempo fino ad arrivare ai giorni nostri con il seguente percorso:

- Direttiva CEE 82/501 (Seveso I)
- Direttiva 96/82/CE (Seveso II)
- Direttiva 2003/105/CE (Modifica della direttiva Seveso II)
- Direttiva 2012/18/UE (Seveso III)

La direttiva Seveso III è stata recepita dall'Italia con il D.Lgs. 105/2015 [8] ed è divisa in 4 capi:

- Capo I: Principi generali e campo di applicazione
- Capo II: Competenze
- Capo III: Adempimenti
- Capo IV: Sanzioni, disposizioni finanziarie e transitorie, abrogazioni

All'interno del Capo I del decreto sono presenti le finalità di questo, che sancisce la prevenzione di incidenti rilevanti connessi a sostanze pericolose, ovvero un evento che produca un grosso rischio per la salute umana o per l'ambiente immediato o ritardato. Vengono poi chiarite le applicazioni esonerate e l'ambito in cui è in vigore il decreto di legge dando vita ad una distinzione tra stabilimenti di soglia inferiore e stabilimenti di soglia superiore, tramite alcune definizioni:

«stabilimento»: tutta l'area sottoposta al controllo di un gestore, nella quale sono presenti sostanze pericolose all'interno di uno o più impianti, comprese le infrastrutture o le attività comuni o connesse; gli stabilimenti sono stabilimenti di soglia inferiore o di soglia superiore;

«stabilimento di soglia inferiore»: uno stabilimento nel quale le sostanze pericolose sono presenti in quantità pari o superiori alle quantità elencate nella colonna 2 della parte 1 o nella colonna 2 della parte 2 dell'allegato 1, ma in quantità inferiori alle quantità elencate nella colonna 3 della parte 1, o nella colonna 3 della parte 2 dell'allegato 1, applicando, ove previsto, la regola della sommatoria di cui alla nota 4 dell'allegato 1;

«stabilimento di soglia superiore»: uno stabilimento nel quale le sostanze pericolose sono presenti in quantità pari o superiori alle quantità elencate nella colonna 3 della parte 1 o nella colonna 3 della parte 2 dell'allegato 1, applicando, ove previsto, la regola della sommatoria di cui alla nota 4 dell'allegato 1;

«gestore»: qualsiasi persona fisica o giuridica che detiene o gestisce uno stabilimento o un impianto, oppure a cui è stato delegato il potere economico o decisionale determinante per l'esercizio tecnico dello stabilimento o dell'impianto stesso;

«sostanza pericolosa»: una sostanza o miscela di cui alla parte 1 o elencata nella parte 2 dell'allegato 1, sotto forma di materia prima, prodotto, sottoprodotto, residuo o prodotto intermedio;

Nel Capo II sono definiti gli organi coinvolti nell'applicazione del decreto di legge. All'interno del D.Lgs. 105/2015 vengono coinvolti il Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare e il Ministero dell'Interno, il primo si occupa oltre che della valutazione e dei controlli come dichiarato nel decreto anche del controllo di incidenti rilevanti e dello scambio di informazioni con la Commissione Europea e gli altri stati membri dell'UE, mentre il secondo si occupa di istituire un Comitato Tecnico Regionale (CTR). È poi coinvolta la Regione e altri enti territoriali che si occupano delle ispezioni e dell'urbanizzazione relativa alla presenza di impianti soggetti al decreto. Sono poi coinvolti altri enti come l'ISPRA, l'INAIL, l'Istituto Superiore di Sanità, il Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco e a richiesta di alcuni enti territoriali anche l'ARPA.

Il Comitato Tecnico Regionale è istituito con la partecipazione di tutti gli enti sopracitati ed è soggetto ad un proprio regolamento. Il CTR deve effettuare delle istruttorie sugli aspetti di sicurezza, dar vita ad un piano di ispezioni ordinarie e applicare le possibili sanzioni.

Nel Capo III sono definiti gli adempimenti dei vari attori coinvolti nella prevenzione di incidenti rilevanti. Viene chiarito che il gestore deve adottare qualsiasi misura atta a prevenire e mitigare incidenti che possono incidere sulla salute umana o sull'ambiente e deve dimostrare alle autorità il rispetto di tali misure. Il gestore deve inviare alle autorità preposte un documento detto "notifica" in cui sono specificate le sostanze pericolose presenti nell'impianto, le loro condizioni di conservazione e il loro utilizzo. Tale provvedimento è previsto sia per gli stabilimenti di soglia inferiore che per quelli di soglia superiore.

Nel caso di stabilimenti di soglia superiore il gestore deve redigere un "rapporto" di sicurezza. All'interno di questo il gestore deve dimostrare di aver dato vita alla politica di prevenzione per gli incidenti, di aver individuato i possibili pericoli per incidenti rilevanti e gli scenari che ne possono conseguire. Deve inoltre comunicare all'interno del rapporto quali sono i documenti forniti alle varie autorità competenti e la redazione del piano di emergenza interna.

Il rapporto di sicurezza è sottoposto a riesamina:

- ogni 5 anni
- a seguito di modifiche dell'impianto
- a seguito di incidenti rilevanti o su richiesta degli enti coinvolti

Nel caso di stabilimento di soglia superiore il gestore deve occuparsi di un Piano di Emergenza Interna che è lo strumento utile per controllare e circoscrivere gli incidenti al fine di minimizzarne gli effetti per la salute umana e per l'ambiente, informare adeguatamente i lavoratori e le autorità locali e provvedere al ripristino dell'ambiente a valle di un incidente rilevante.

Nei casi sia di stabilimento di soglia inferiore che di stabilimento di soglia superiore è necessario predisporre da parte del Prefetto competente un Piano di Emergenza Esterna. Il piano è redatto in base alle informazioni fornite dal gestore e deve circoscrivere gli incidenti al fine di limitare gli effetti, informare adeguatamente la popolazione e provvedere alla bonifica dell'ambiente riportandolo alle condizioni precedenti all'incidente.

Nel Capo IV del decreto sono infine predisposte quelle che sono le sanzioni amministrative e penali nel caso di non rispetto del decreto di legge.

Tra le applicazioni esonerate dal decreto D.Lgs. 105/2015 ci sono le applicazioni offshore, per queste, che ricoprono un importante caso di interesse all'interno di questo lavoro, bisogna rifarsi alla direttiva 2013/30/UE

1.1.2 Direttiva 2013/30/UE e D.Lgs 145/2015

Per regolamentare l'uso di sostanze pericolose in ambiente offshore è in vigore la Direttiva europea 2013/30/UE [9].

Questa direttiva nasce all'indomani dell'incidente avvenuto il 20 Aprile 2010 nel Golfo del Messico sulla piattaforma Deepwater Horizon, appartenente alla British Petroleum e impegnata in operazioni di perforazione del Pozzo Macondo. A seguito dell'incidente è nata la necessità di migliorare le condizioni di sicurezza in questo campo industriale.



Figura 1.5: Operazioni di emergenza sulla piattaforma Deepwater horizon [10].

La direttiva mira a ridurre in maniera significativa la probabilità di incidenti rilevanti legati ad attività nel settore Oil & Gas in ambito offshore e a limitarne le possibili conseguenze. Stabilisce le condizioni minime per avviare delle operazioni in condizioni di sicurezza e aumentare la rapidità di risposta da parte dei sistemi di sicurezza in caso di incidente. La direttiva comprende gli impianti futuri e quelli esistenti.

La sua esigenza nasce per unificare le legislazioni dei vari stati membri dell'Unione Europea che davano vita ad un quadro normativo troppo frammentato per poter minimizzare la

probabilità di un incidente rilevante e per poter intervenire in maniera da poter mitigare al meglio le conseguenze.

La direttiva indica come le autorità che rilasciano la licenza per operazioni in ambito Oil & Gas devono valutare le capacità finanziarie e tecniche del richiedente come adeguate e le operazioni possono essere condotte solo da operatori a cui viene rilasciata la licenza. L'operatore è il primo responsabile per la sicurezza di tali operazioni e deve sempre dimostrare di poter rispettare le condizioni di sicurezza prescritte in modo da ridurre il rischio di incidente rilevante il più ragionevolmente possibile.

La normativa sancisce l'obbligo di coinvolgere i lavoratori nelle questioni che riguardano la sicurezza e la salute sul lavoro.

È inoltre importante assicurarsi che il pubblico sia informato e interpellato sulle decisioni relative alle operazioni in quanto queste possono avere effetti significanti sulla salute pubblica e l'ambiente all'interno dell'Unione Europea.

La direttiva viene applicata sia alle installazioni fisse che a quelle mobili riguardanti l'intero ciclo vita, ovvero sia le strutture per l'esplorazione che quelle per la produzione, dalla fase di design a quella di decommissioning.

L'operatore deve redigere un documento in cui identifica e definisce gli scenari incidentali derivanti dai possibili pericoli presenti nelle operazioni lavorative, includendo i possibili danni ambientali e climatici. In questo modo l'operatore può dar vita a sistemi di prevenzione per gli incidenti rilevanti, descritti all'interno del documento. Da questo report l'operatore deve dar vita ad un piano di emergenza interna per incidenti rilevanti.

L'operatore, in caso di incidente rilevante, deve avvisare immediatamente gli stati membri dell'Unione Europea comunicando il luogo esatto, l'importanza e la natura dell'incidente. Egli deve altresì notificando i provvedimenti presi e il peggior scenario incidentale possibile derivante dall'incidente. Una pronta risposta deve arrivare dall'operatore in collaborazione con gli stati membri per mitigare il più possibile gli effetti derivanti dallo scenario incidentale.

La direttiva impone una procedura unificata per lo scambio di dati riguardanti la sicurezza in ambito Oil & Gas tra paesi membri e tra autorità e operatori in modo da migliorarne l'efficacia. La Commissione è tenuta a pubblicare dei report periodici sulle attività inerenti la sicurezza e l'impatto ambientale del settore.

Un piano di emergenza esterna per incidenti rilevanti deve essere istituito tra stati membri e industria petrolifera, basandosi sull'analisi del rischio effettuata sul report degli scenari incidentali.

In Italia la direttiva 2013/30/UE è stata recepita tramite il D.Lgs. 145/2015 e vede tra i principali attori nell'attuazione del decreto il Ministero per lo sviluppo economico e il Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare.

1.2 Attività di ricerca in ambito offshore

A seguito del D.Lgs 145/2015 il MISE ha attuato delle attività di ricerca mirate a migliorare la sicurezza e minimizzare il rischio di incidenti rilevanti in ambito offshore.

Da questi propositi è nato l'accordo tra DGS UNMIG e il Politecnico di Torino per la realizzazione del "Centro di Competenza SEASTAR - Sustainable Energy Applied Sciences, Technology & Advanced Research" ([10]) nato nel 2018, mira ad essere un centro

multidisciplinare finalizzato a promuovere l'innovazione tecnologica nel campo della sicurezza riguardante il settore Oil & Gas. Come dichiarato da Franco Terlizzone, allora Direttore generale per la sicurezza ambientale delle attività minerarie ed energetiche:

"Siamo lieti di presentare un nuovo progetto frutto della proficua collaborazione della DGS UNMIG con il Politecnico di Torino, ormai consolidata. 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" [11].

Il polo si inserisce all'interno della collaborazione già esistente tra DGS UNMIG e il Politecnico di Torino che aveva precedentemente dato vita al polo di ricerca SEADOG. Il SEADOG (Safety & Environmental Analysis Division for Oil & Gas) nasce nel 2015 come un gruppo di ricerca atto a creare delle attività di formazione e supporto sulla sicurezza offshore, che coinvolge i dipartimenti DENERG, DIATI e DISAT del Politecnico di Torino.

La ricerca sulla sicurezza industriale in ambito offshore all'interno del SEADOG si basa su un approccio basato sull'analisi di rischio. Esistono due diversi approcci per l'analisi di rischio:

- un approccio qualitativo,
- un approccio quantitativo.

All'interno del nostro lavoro ci siamo focalizzati ad un approccio quantitativo (QRA) che mira a guidare la fase di progettazione e l'intero ciclo vita dell'applicazione industriale.

L'obiettivo dell'analisi di rischio quantitativa è quello di valutare il livello di rischio delle apparecchiature a cui vengono esposti persone ed ambiente, ciò viene effettuato identificando tutti i possibili incidenti e calcolando un livello di rischio globale che deve essere accettabile. All'interno del processo di analisi di rischio le attività del SEADOG si focalizzano sulla analisi delle conseguenze (o "Accident Simulation") come mostrato in Fig.1.6.

APPROACH TO RISK ASSESSMENT

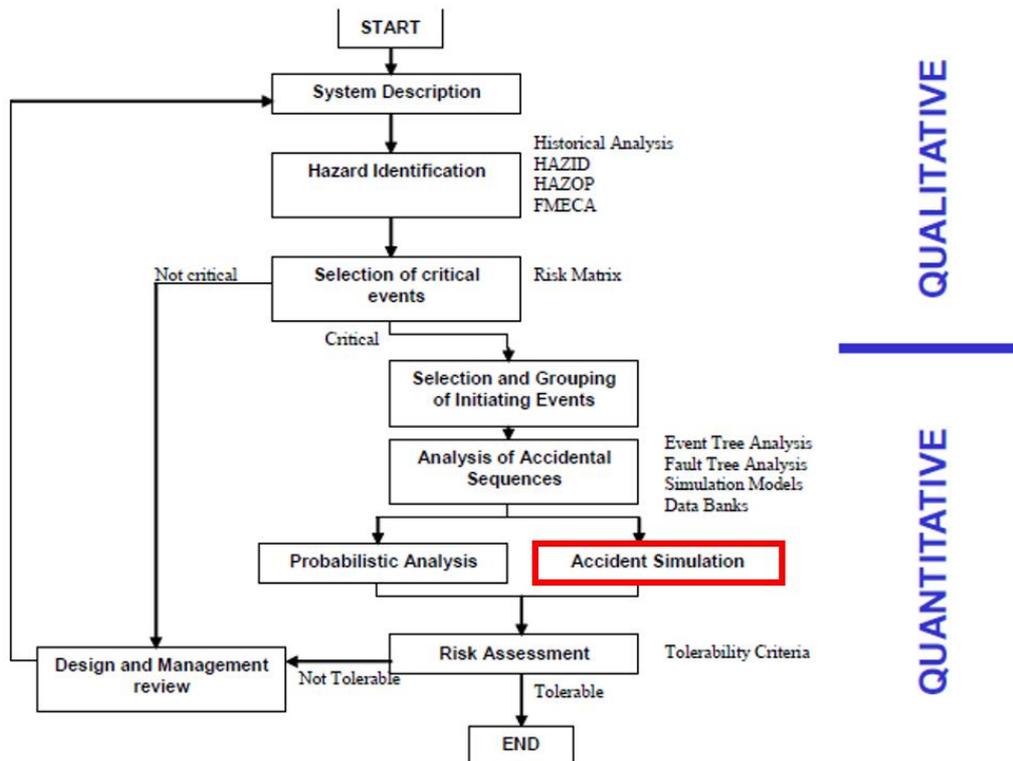


Figura 1.6: Flow chart per la realizzazione di una analisi di rischio [12].

L'analisi delle conseguenze è uno dei tasselli della valutazione del rischio quantitativa e fornisce delle informazioni essenziali per la valutazione dei potenziali pericoli e delle aree coinvolte da danno. In questo lavoro l'analisi delle conseguenze riguarderà lo studio dell'evoluzione di emissioni incidentali di gas pericolosi in pressione che possono causare danni a persone e ambiente, partendo dalla caratterizzazione della fonte di emissione, ad arrivare alla quantificazione delle aree di danno e delle conseguenze dovute alla sostanza.

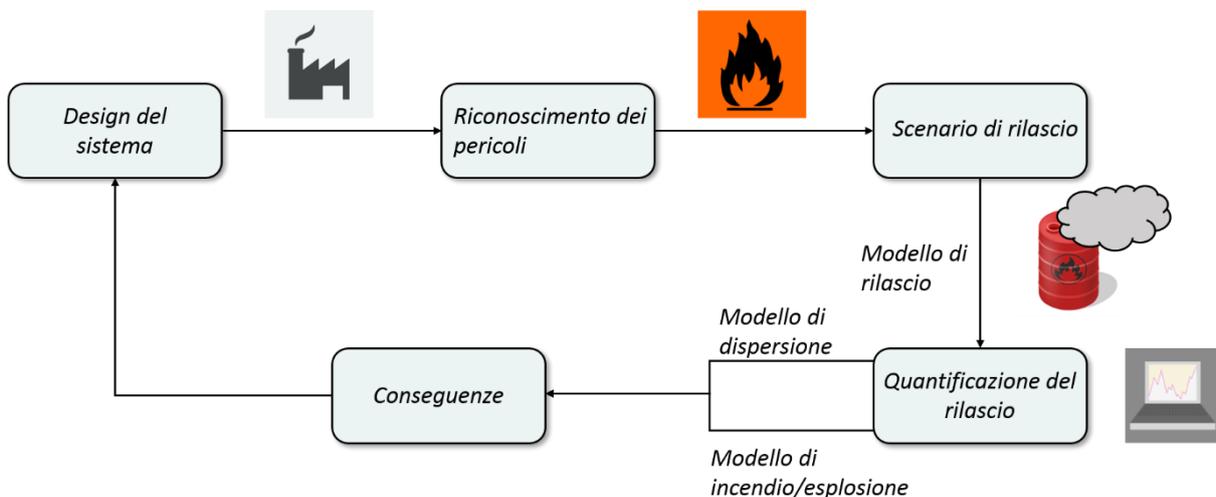


Figura 1.7: Approccio all'analisi delle conseguenze per un rilascio incidentale di sostanze pericolose

Per studiare questi scenari sono necessari modelli matematici o sperimentali appropriati per simulare i fenomeni coinvolti. Da qui l'esigenza di usare dei tool di CFD (Computational Fluid Dynamics) per studiare l'evoluzione di un rilascio di gas pressurizzato pericoloso in atmosfera, guidando lo studio della sicurezza e del design di ambienti industriali congestionati.

1.3 CFD

La fluidodinamica computazionale è un metodo che utilizza l'analisi numerica per studiare la dinamica dei fluidi e i relativi fenomeni associati. Questo tool permette di simulare i trasferimenti di massa e calore o le reazioni chimiche e fisiche in cui sono coinvolte le varie sostanze.

La CFD è uno strumento sempre più largamente utilizzato in tutti gli ambiti industriali, che permette di analizzare i problemi di fluidodinamica in maniera più facile e immediata rispetto a dei test sperimentali, in una fase precedente alla progettazione, diventando così non solo uno strumento di valutazione ma anche di design.

Questo tipo di approccio inizia ad essere utilizzato in maniera significativa intorno agli anni '70 al crescere della potenza computazionale a disposizione; nel tempo questa tecnica ha ottenuta maggiore flessibilità geometrica, divenendo capace di modellare ambienti sempre più complessi, e ha sviluppato nuovi modelli per descrivere fenomeni fisici come la turbolenza, fluidi multifase, interazione fluido-struttura, scambio di calore, etc.

La CFD è dunque diventata parte integrante del processo di progettazione grazie alla possibilità di analizzare le prestazioni delle applicazioni industriali prima della loro produzione, dando vita ad un prodotto ottenuto in tempi più brevi e con costi maggiormente contenuti e incentivando lo sviluppo tecnologico di progetti che sarebbero impossibili da studiare solamente tramite test sperimentali.

La fluidodinamica computazionale si basa sulla risoluzione numerica delle equazioni di Navier-Stokes, sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali che delineano il comportamento di un fluido.

Con questo metodo, il dominio di interesse viene suddiviso in celle o volumi di controllo. In ciascuna di queste celle, le equazioni di Navier-Stokes possono essere riscritte come equazioni algebriche che mettono in relazione velocità, temperatura, pressione e altre variabili, con i valori nelle celle vicine. Queste equazioni vengono quindi risolte numericamente, dando un quadro completo del flusso fino alla risoluzione della griglia. L'insieme di equazioni risultanti può quindi essere risolto iterativamente, dando una descrizione completa del flusso in tutto il dominio.

I modelli matematici sono sviluppati come approssimazione della realtà, sulla base di questi modelli è necessario lo sviluppo di modelli numerici per ottenere delle soluzioni approssimative per la soluzione del problema fisico. Per convalidare i modelli numerici è necessario confrontare i risultati numerici ottenuti con dei risultati sperimentali.

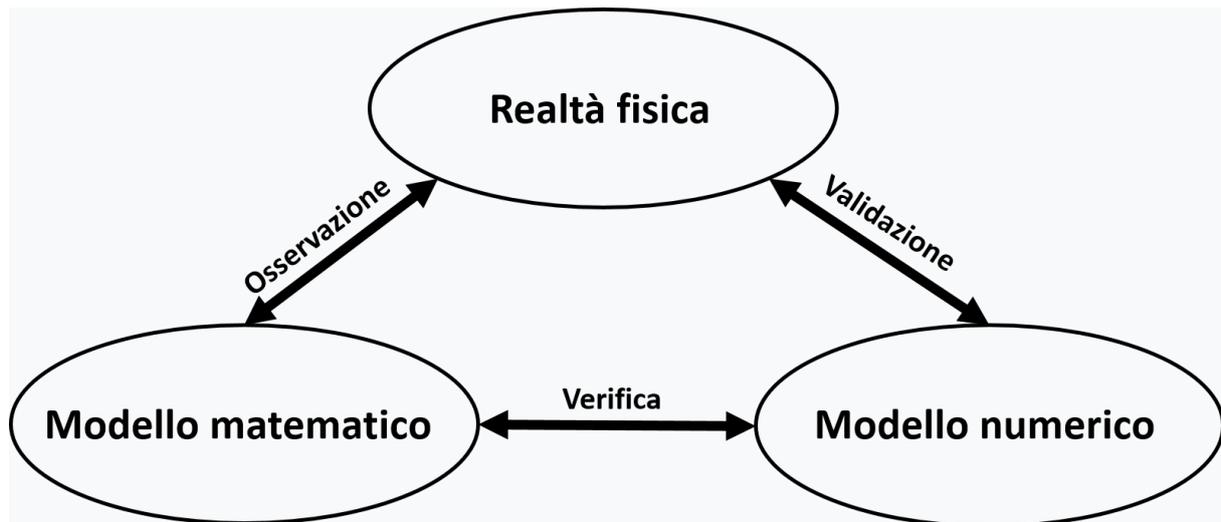


Figura 1.8: Illustrazione del paradigma di base di un modello numerico [43]

All'interno del SEADOG vengono oggi realizzati tramite il software commerciale ANSYS Fluent dei modelli CFD per lo studio di rilasci incidentali di gas pressurizzati in ambiente.

I modelli CFD esistenti e futuri sviluppati all'interno del SEADOG, dovranno essere validati attraverso una campagna sperimentale al fine di poter essere utilizzati come strumenti all'interno dello studio delle conseguenze di rilasci incidentali di gas pressurizzati in ambienti congestionati.

La validazione avverrà tramite un laboratorio sperimentale in cui sarà situata una galleria del vento presso cui verranno effettuati esperimenti di rilascio di gas in pressione, ricostruendo i casi analizzati nelle simulazioni CFD.

1.4 Obiettivi della tesi

Questa tesi è finalizzata a fornire uno strumento per la valutazione delle conseguenze di uno scenario incidentale all'interno di una analisi di rischio quantitativa (QRA). Questo studio vuole essere realizzato per un rilascio incidentale di gas pericoloso in pressione; per valutare le aree di danno sarà usata la fluidodinamica computazionale, a scapito di metodi più consolidati come quelli empirici.

Per lo studio CFD di questo problema si è deciso di adottare un approccio "Two-Steps" (29,30), ovvero disaccoppiare il fenomeno in due distinte fasi di studio:

- fase di rilascio: il gas, appena rilasciato, ha un alto grado di sottosviluppamento che lo porta ad accelerare nell'ambiente di scarico dando vita ad un regime supersonico;
- fase di dispersione: il gas, ad una certa distanza dal punto di rilascio, non è più compresso e ha decelerato fino a dar vita ad un regime subsonico.

in quanto le due fasi del problema presentano differenze di alcuni ordini di grandezza sia sulla scala temporale che su quella dimensionale, rendendo difficile sviluppare una singola simulazione che modella in maniera accurata entrambi i fenomeni.

A questo punto il modello applicato alla fase di rilascio è stato ipotizzato valido per un dominio limitato, chiamato "Source Box". Ipotizzando possibile un rilascio da un tubo facente parte di un fascio tubiero questo dominio è immaginato con un tubo al suo interno, utile per studiare l'interazione di un fluido incidente su un ostacolo.

L'obiettivo di questa tesi sarà quindi capire come i vari parametri fisici all'interno del dominio della prima fase (dimensione foro, pressione di rilascio, dimensione ostacolo, ...) possono influire sulla velocità di flusso e sulla frazione massica della sostanza, grandezze che diverranno condizione di input per la fase di dispersione. Sarà quindi svolta una analisi di sensitività mirata a valutare quali sono le dipendenze tra i dati di input della Source Box e le grandezze in output necessarie per realizzare la seconda fase della simulazione. Inoltre, è obiettivo di questa tesi trovare delle relazioni tra queste grandezze in modo da ridurre il numero di parametri di input indipendenti e conseguentemente ridurre il numero di Source Box da studiare per creare una libreria esaustiva di casi per chi dovrà utilizzare questo strumento all'interno della propria analisi di rischio.

1.5 Struttura tesi

In questo paragrafo verrà brevemente riportata la struttura delle tesi.

All'interno del capitolo 2 verranno presentate le casistiche di rilascio rilevanti per il nostro campo di studi. Successivamente verrà fatto un breve cenno sulla teoria fluidodinamica con un breve focus sulla teoria dei fluidi comprimibili. Nel paragrafo successivo verranno presentati i modelli usati per la descrizione del problema fisico e verrà fatto un confronto tra modelli empirici e modelli computazionali. Sarà poi esposto l'approccio computazionale "Two-Steps", in questo modo si potrà definire il contesto che costituisce il cuore della tesi.

Nel capitolo 3 verrà definito il caso studio a cui è applicato questo approccio computazionale e quali possono i futuri risvolti. Successivamente verrà presentato il percorso con cui si è articolata la tesi, esponendo quali sono stati gli aspetti coinvolti da questo lavoro. Sarà, inoltre, esposta l'implementazione della simulazione, in modo da spiegare al lettore quali sono le ipotesi imposte tramite il software di calcolo.

Nel capitolo 4 verranno mostrati i risultati ottenuti dalle varie simulazioni svolte e delle correlazioni tra le grandezze caratteristiche del fenomeno e i parametri coinvolti nello studio in modo da fornire sia uno strumento lavorativo utile ai fini del progetto in cui è inserito questo lavoro sia un ulteriore strumento per l'analisi e comprensione del fenomeno.

A seguito del capitolo 4, avremo il capitolo 5, atto alle conclusioni, in cui verranno ripresi gli obiettivi iniziali e verrà fatta un'analisi del loro raggiungimento ponendo in rilievo i risultati più interessanti e le criticità emerse.

2. Teoria

All'interno di questo secondo capitolo verrà definito il contesto in cui è inserito il lavoro di tesi. Inizialmente verranno esposte le equazioni di Navier-Stokes che definiscono la meccanica dei fluidi e verrà fatto un approfondimento sui fluidi comprimibili e i getti turbolenti che sono materia di interesse ai fini della formulazione di un modello computazionale per il rilascio di gas compresso. Verranno poi esposte le tipologie di un rilascio di gas compresso in ambito industriale e verrà illustrata la sua modellazione matematica.

2.1 Formulazione matematica

Nei paragrafi successivi sarà riportata la formulazione matematica dei concetti propedeutici a comprendere il lavoro svolto.

2.1.1 Equazioni di Navier-Stokes

Le equazioni di Navier-Stokes delineano il comportamento di un fluido e compaiono come essenziali nello studio di svariati fenomeni fisici. Sono delle equazioni differenziali alle derivate parziali e furono formalizzate da Claude-Louis Navier e George Stokes intorno alla metà del XIX secolo.

Queste equazioni sono state derivate tramite l'utilizzo delle equazioni di conservazione della massa e di conservazione della quantità di moto, dando vita ad un modello matematico in grado di descrivere interamente le caratteristiche di un fluido.

Ora riportiamo l'equazione della conservazione della massa [13]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

E successivamente le equazioni della conservazione della quantità di moto [(14, 2003)13]:

quantità di moto lungo x:

$$\rho \left[\left(\frac{\partial u}{\partial t} \right) + u \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right) + v \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) + w \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] = - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left[\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \right] \quad (2.2)$$

quantità di moto lungo y:

$$\rho \left[\left(\frac{\partial v}{\partial t} \right) + u \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right) + v \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) + w \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] = - \frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left[\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \right] \quad (2.3)$$

quantità di moto lungo z:

$$\rho \left[\left(\frac{\partial w}{\partial t} \right) + u \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) + v \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right) + w \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right) \right] = - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + \left(\frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \right] \quad (2.4)$$

Nella parte sinistra delle equazioni di quantità di moto è presente la combinazione lineare della derivata temporale e del termine convettivo, questa combinazione rappresenta la variazione totale del campo di velocità del fluido lungo le linee di flusso. Mentre a destra è presente il termine dovuti alle forze e il termine di diffusione che considera anche la viscosità del fluido.

2.1.2 Fluidi comprimibili

Una volta esposte le leggi che regolano i fluidi è bene focalizzarsi sulla categoria di fluidi di interesse. All'interno di questa tesi il fenomeno studiato, ovvero un gas compresso rilasciato a pressione ambiente, ricade nell'applicazione dei fluidi comprimibili.

Un fluido comprimibile è definito come un fluido a densità variabile [14].

Si consideri un elemento di volume del fluido v e una pressione esercitata da un altro elemento di volume su un lato p e assumiamo che la pressione cresca infinitesimamente di una quantità dp . A questo punto l'elemento di volume viene compresso di una quantità dv . Allora il fattore di comprimibilità del fluido è definito come:

$$\beta = -\frac{1}{v} \frac{dv}{dp} \quad (2.5)$$

Ed indica la variazione di volume dell'elemento di fluido per unità di pressione.

Ma è noto che quando un gas viene compresso la sua temperatura tende a crescere a causa della quantità di calore scambiata dal volumetto di fluido. Allora se la temperatura è costante si ha un fattore di comprimibilità isoterma:

$$\beta_T = -\frac{1}{v} \left(\frac{dv}{dp} \right)_T \quad (2.6)$$

Se invece l'elemento di fluido non ha scambi di calore con l'esterno il fattore di comprimibilità è detto isentropico:

$$\beta_S = -\frac{1}{v} \left(\frac{dv}{dp} \right)_S \quad (2.7)$$

Assunto che l'elemento di volume abbia massa unitaria e v sia il volume specifico per unità di massa, è possibile definire la densità del fluido come:

$$\rho = \frac{1}{v} \quad (2.8)$$

E l'Eq. 2.5 diventa:

$$\beta = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (2.9)$$

Per qualsiasi variazione di pressione il nostro fluido subisce una conseguente variazione di densità:

$$d\rho = \rho \beta dp \quad (2.10)$$

Sino ad ora è stato considerato un volume di fluido a riposo, ma considerando un fluido ad un'alta velocità si può vedere come conseguenza un dp grande. Per un dato dp possiamo vedere come si abbia una considerevole variazione di densità in un gas, a differenza di un fluido liquido. Quindi una grossa variazione di pressione può portare il fluido ad alte velocità, con una variazione di densità trascurabile in un liquido e invece con una grossa variazione di densità in

un gas. Allora i fluidi in cui abbiamo una variazione sensibile di densità possono essere detti comprimibili.

A questo punto si vogliono esporre i concetti di velocità del suono e numero di Mach, utili alla piena comprensione di questo lavoro. Per arrivare a questi concetti è necessario introdurre le equazioni di continuità, conservazione della quantità di moto e conservazione dell'energia per fluidi comprimibili.

Si consideri un flusso lungo un dominio monodimensionale lungo cui le proprietà del fluido (velocità, pressione, densità, temperatura ed energia interna) variano. Per calcolare queste variazioni bisogna applicare le equazioni integrali di conservazione lungo il dominio rappresentato in Fig.2.1.

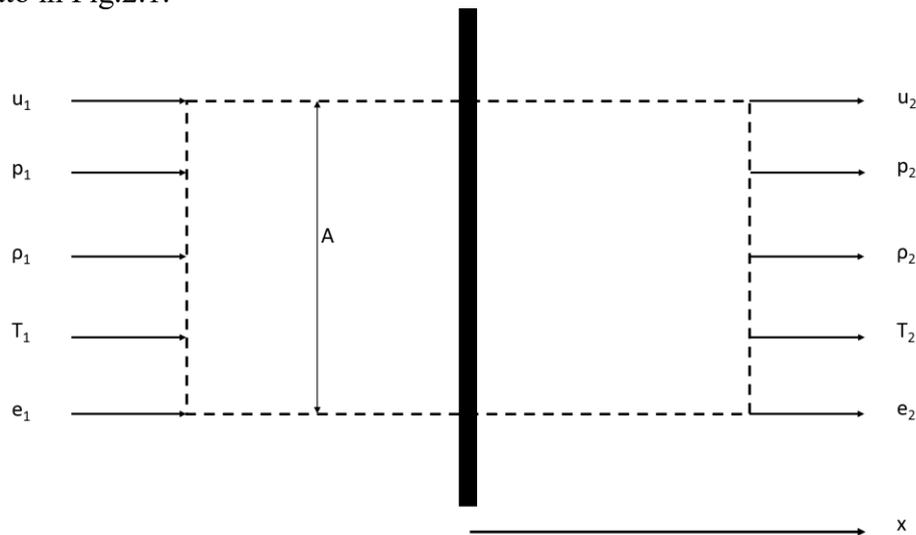


Figura 2.1: Volume di controllo del fluido

Si può notare come ai lati del volume di controllo, sia prima della sezione 1 che dopo la sezione 2 le proprietà del fluido sono uniformi e sia la sezione 1 che la 2 hanno area pari ad A . Assumiamo poi che il flusso sia stazionario e che le forze esterne siano nulle. A questo punto è riportata l'equazione della continuità in forma stazionaria:

$$\oiint_S \rho \mathbf{V} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (2.11)$$

Si può notare che i vettori \mathbf{V} e $d\mathbf{S}$ sono paralleli e l'equazione diventa:

$$-\rho_1 u_1 A + \rho_2 u_2 A = 0 \quad (2.12)$$

$$\rho_1 u_1 = \rho_2 u_2 \quad (2.13)$$

L'Eq. 2.13 è l'equazione di continuità per un flusso stazionario monodimensionale.

L'equazione integrale di conservazione della quantità di moto per un fluido stazionario e forze esterne nulle risulta:

$$\oiint_s (\rho \mathbf{v} \cdot d\mathbf{S}) \mathbf{v} = - \oiint_s p d\mathbf{S} \quad (2.14)$$

$$\oiint_s (\rho \mathbf{v} \cdot d\mathbf{S}) \mathbf{u} = - \oiint_s (p d\mathbf{S})_x \quad (2.15)$$

$$\rho_1(-u_1 A)u_1 + \rho_2(u_2 A)u_2 = -(-p_1 A + p_2 A) \quad (2.16)$$

$$p_1 + \rho_1 u_1^2 = p_2 + \rho_2 u_2^2 \quad (2.17)$$

L'Eq. 2.17 è l'equazione della conservazione della quantità di moto per un flusso stazionario monodimensionale.

L'equazione per l'energia in forma integrale per un flusso stazionario con forze esterne nulle è invece così formulata:

$$\dot{Q} - \oiint_s p \mathbf{v} \cdot d\mathbf{S} = \oiint_s \rho \left(e + \frac{V^2}{2} \right) \mathbf{v} \cdot d\mathbf{S} \quad (2.18)$$

$$\dot{Q} - (p_2 u_2 A - p_1 u_1 A) = \rho_2 \left(e_2 + \frac{u_2^2}{2} \right) u_2 A - \rho_1 \left(e_1 + \frac{u_1^2}{2} \right) u_1 A \quad (2.19)$$

$$\frac{\dot{Q}}{A} + p_1 u_1 + \rho_1 \left(e_1 + \frac{u_1^2}{2} \right) u_1 = p_2 u_2 + \rho_2 \left(e_2 + \frac{u_2^2}{2} \right) u_2 \quad (2.20)$$

$$\frac{\dot{Q}}{\rho_1 u_1 A} + \frac{p_1}{\rho_1} + e_1 + \frac{u_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho_2} + e_2 + \frac{u_2^2}{2} \quad (2.21)$$

Essendo $\rho_1 u_1 A$ la portata massica di fluido, allora il rapporto $\dot{Q}/\rho_1 u_1 A$ indica il calore scambiato per unità di massa e il termine $p/\rho + e$ rappresenta l'entalpia del fluido. L'equazione per la conservazione dell'energia per un flusso stazionario è:

$$q + h_1 + \frac{u_1^2}{2} = h_2 + \frac{u_2^2}{2} \quad (2.22)$$

Quindi le equazioni 13, 17 e 22 sono le equazioni fondamentali per i un flusso comprimibile monodimensionale, stazionario.

Un'importante grandezza per lo studio dei fluidi comprimibili è la velocità del suono. Si consideri un'onda sonora che si muove all'interno di un gas con velocità c . Considerando il nostro sistema di riferimento solidale all'onda sonora il gas si muove verso l'onda con velocità c e viene perturbato dall'onda modificando le sue proprietà a valle dell'onda di una quantità infinitesimale come si può vedere in Fig.2.2.

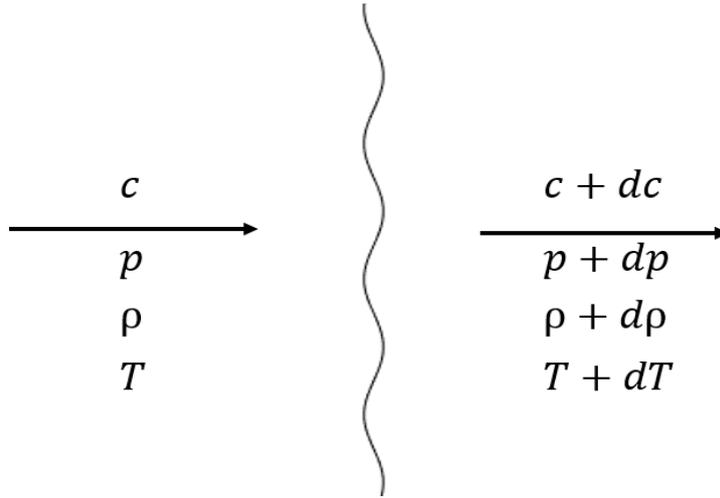


Figura 2.2: Perturbazione di un fluido a causa di un'onda sonora

Ora è possibile applicare a questo caso l'Eq. 213 della conservazione della massa:

$$\rho c = (\rho + d\rho)(c + dc) \quad (2.23)$$

$$\rho c = \rho c + \rho dc + d\rho c + d\rho dc \quad (2.24)$$

Il prodotto $d\rho dc$ è dovuto a due quantità infinitesimali, ed è quindi trascurabile, si ottiene così:

$$c = -\rho \frac{dc}{d\rho} \quad (2.25)$$

Applicando l'equazione della quantità di moto si ottiene:

$$p + \rho c^2 = (p + dp) + (\rho + d\rho)(c + dc)^2 \quad (2.26)$$

Ignorando i prodotti infinitesimali, l'equazione diventa:

$$dp = -2c\rho dc - c^2 d\rho \quad (2.27)$$

$$dc = \frac{dp + c^2 d\rho}{-2c\rho} \quad (2.28)$$

Sostituendo la 28 nella 25, si ottiene:

$$c = -\rho \left[\frac{\frac{dp}{d\rho} + c^2}{-2c\rho} \right] \quad (2.29)$$

Risolviendo per c^2 :

$$c = \frac{\frac{dp}{d\rho} + c^2}{2c} \quad (2.30)$$

$$2c^2 - c^2 = \frac{dp}{d\rho} \quad (2.31)$$

$$c^2 = \frac{dp}{d\rho} \quad (2.32)$$

All'interno del gas gli effetti irreversibili dovuti alle forze di attrito e agli scambi termici sono trascurabili, quindi il fenomeno può dirsi isentropico:

$$c^2 = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s \quad (2.33)$$

E si ottiene così l'espressione della velocità del suono, che è subito possibile vedere essere correlata al coefficiente di comprimibilità.

Per un gas perfetto si ricorda che la trasformazione isentropica è definita:

$$\left(\frac{p}{\rho}\right)^\gamma = k \quad (2.34)$$

Dove k è una costante, e la derivata risulta:

$$\left(\frac{dp}{d\rho}\right)_s = \frac{\gamma p}{\rho} \quad (2.35)$$

E l'Eq. 2.33 diventa:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma p}{\rho}} \quad (2.36)$$

$$c = \sqrt{\gamma RT} \quad (2.37)$$

Fornendo due possibili formulazioni per la velocità del suono sotto l'ipotesi di gas ideale. Si può notare dall'equazione 37 come la velocità del suono sia funzione esclusivamente della temperatura e delle proprietà del gas.

È possibile ora definire il numero di Mach come:

$$M = \frac{v}{c} \quad (2.38)$$

dove:

- v : velocità locale del fluido
- c : velocità locale del suono

Il numero di Mach permette di dare una classificazione dei fluidi in base al regime di velocità del flusso:

- $M < 1$: flusso subsonico
- $M = 1$: flusso sonico
- $M > 1$: flusso supersonico

I casi che verranno analizzati in questa tesi ricadono nel campo di applicazione di flussi supersonici.

2.1.3 Interazione fluido ostacolo

Nel proseguo della tesi sarà utile conoscere le caratteristiche principali dell'interazione del fluido con dei possibili ostacoli. Nei casi di interesse si avrà a che fare con moti turbolenti che incidono su ostacoli di forma cilindrica.

Uno dei fenomeni più rilevanti che viene a crearsi tra fluido e oggetto nel caso di un moto turbolento è la presenza di un forte gradiente di pressione tra monte e valle dell'oggetto. A monte è possibile misurare una forte sovrappressione dovuta dall'urto del fluido sull'ostacolo, questa sovrappressione permette inizialmente al flusso di aderire al cilindro. Successivamente, al cambio di curvatura dell'oggetto, inizia a crearsi una zona di depressurizzazione che comporta il distacco del fluido dall'oggetto (distacco di vena fluida) con la creazione di vortici a valle del cilindro.

Un altro fenomeno peculiare è la creazione di uno strato limite all'interfaccia tra fluido e ostacolo. Questo viene spiegato tramite l'ipotesi di "no slip condition"[13] per cui la velocità del fluido sul cilindro è nulla e cresce all'aumentare della distanza dall'ostacolo sino ad arrivare ad un valore di regime dove il campo non è perturbato dall'oggetto come si può vedere in Fig.2.3.

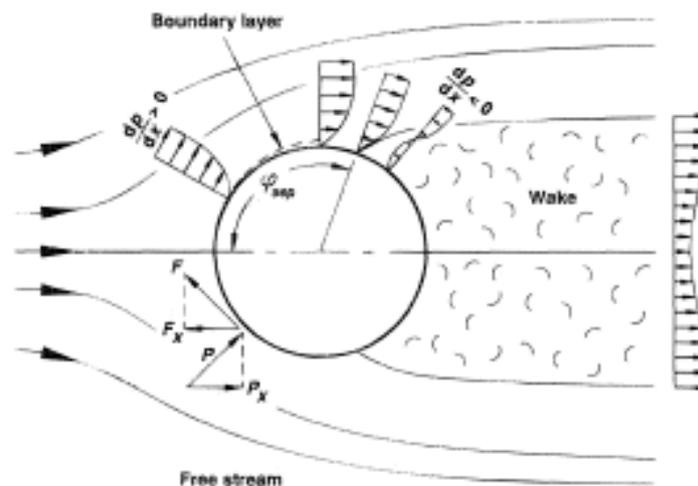


Figura 2.3: Campo di moto intorno ad un cilindro (24)

2.2 Getti turbolenti sottoespansi

Ora che sono stati presentati i concetti basilari sui fluidi comprimibili e l'interazione fluido-ostacolo può essere esposto con maggior cognizione di causa un paragrafo sulla fisica dei getti sottoespansi che caratterizza il rilascio di un gas compresso.

Un getto è un flusso di fluido che viene rilasciato in un altro mezzo fluido circostante tramite un ugello o un foro, arrivando a precorrere anche distanze rilevanti.

Un getto è detto sottoespanso quando il fluido è rilasciato da una pressione maggiore rispetto alla pressione ambiente, l'esistenza di questa tipologia di getto è determinata dalla seguente condizione:

$$\eta_0 \geq \frac{P_0}{P^*} \quad (2.39)$$

dove:

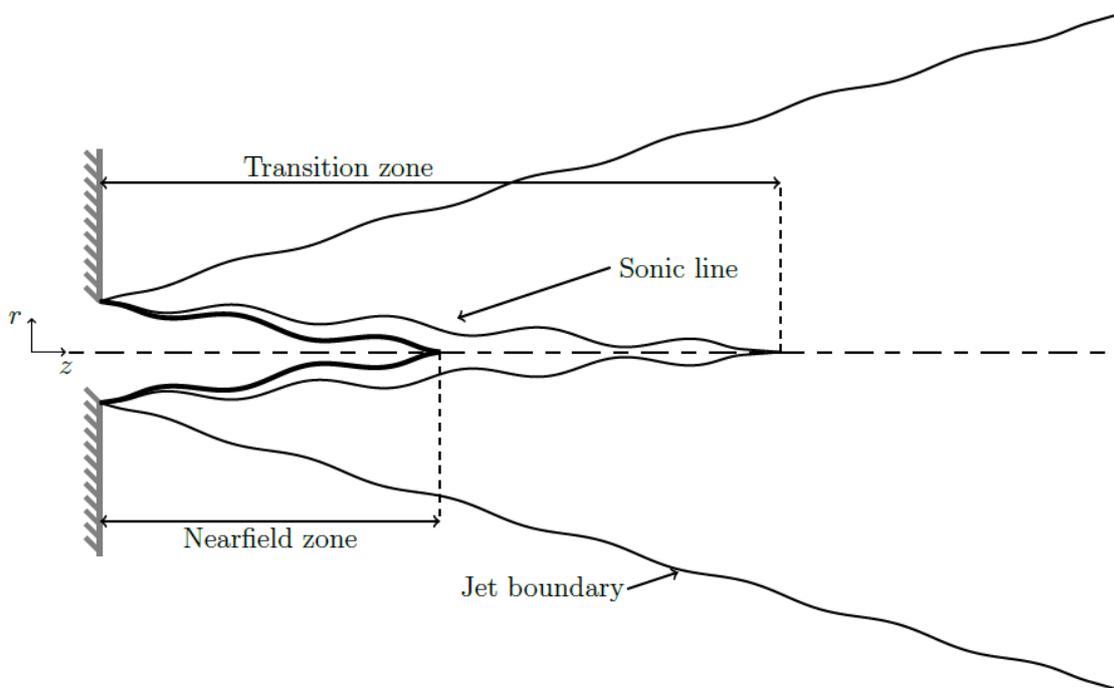
- η_0 : rapporto tra pressione in condizioni di stoccaggio e pressione ambiente,
- P_0 : pressione nelle condizioni di stoccaggio,
- P^* : pressione critica a cui si ha flusso sonico.

2.1.2 Struttura del getto

La struttura stazionaria di un getto turbolento è stata materia di studio per molti in passato ([16],[17],[31]) e per questo verrà fatta una breve descrizione delle sue principali caratteristiche fisiche.

Per iniziare è possibile distinguere tre diverse zone all'interno di un getto turbolento:

- Nearfield zone
- Transition zone
- Farfield zone



La nearfield zone è la zona più vicina alla zona di sbocco del fluido e si suddivide ancora in due parti ovvero il core e il mixing layer. Nel core la sostanza stoccata è totalmente isolata dal fluido che costituisce il mezzo in cui avviene il rilascio ed è caratterizzato da una condizione di comprimibilità, infatti il fluido è sottoposto ad espansione isentropica e a compressione generando così delle onde di shock. Nel mixing layer gli effetti di turbolenza danno vita al contatto tra le varie specie chimiche presenti generando dei vortici nel moto del fluido. La nearfield zone distingue la zona supersonica da quella subsonica ed è delimitata dalle onde soniche.

Alla fine della nearfield zone inizia la transition zone, dove le grandezze fisiche hanno delle variazioni minime, come ad esempio pressione e temperatura, permettendo un miglior miscelamento tra le specie chimiche.

Si arriva poi alla farfield zone dove ormai il getto è totalmente espanso, le grandezze longitudinalmente variano in base all'inverso della distanza dal punto di rilascio, mentre radialmente presentano un profilo gaussiano con il picco sull'asse del getto. Anche se il getto è

ormai sviluppato questo può presentare effetti di comprimibilità fino a che il numero di Mach è maggiore di 0.3.

Di particolare interesse è la prima di queste 3 zone, dove il fluido è governato da forti effetti di comprimibilità e si possono presentare 3 diverse casistiche, dovute al parametro definito nell'Eq. 2.39, di getto sottoespanso:

- Getto moderatamente sottoespanso
- Getto altamente sottoespanso
- Getto estremamente sottoespanso

Il primo caso, detto getto moderatamente sottoespanso, per una specie chimica gassosa con caratteristiche fisiche simili a quelle dell'aria, si ottiene per applicazioni in cui $2 \leq \eta_0 \leq 4$ [18] e il getto presenta una struttura detta a “diamante” come in Fig.2.4.

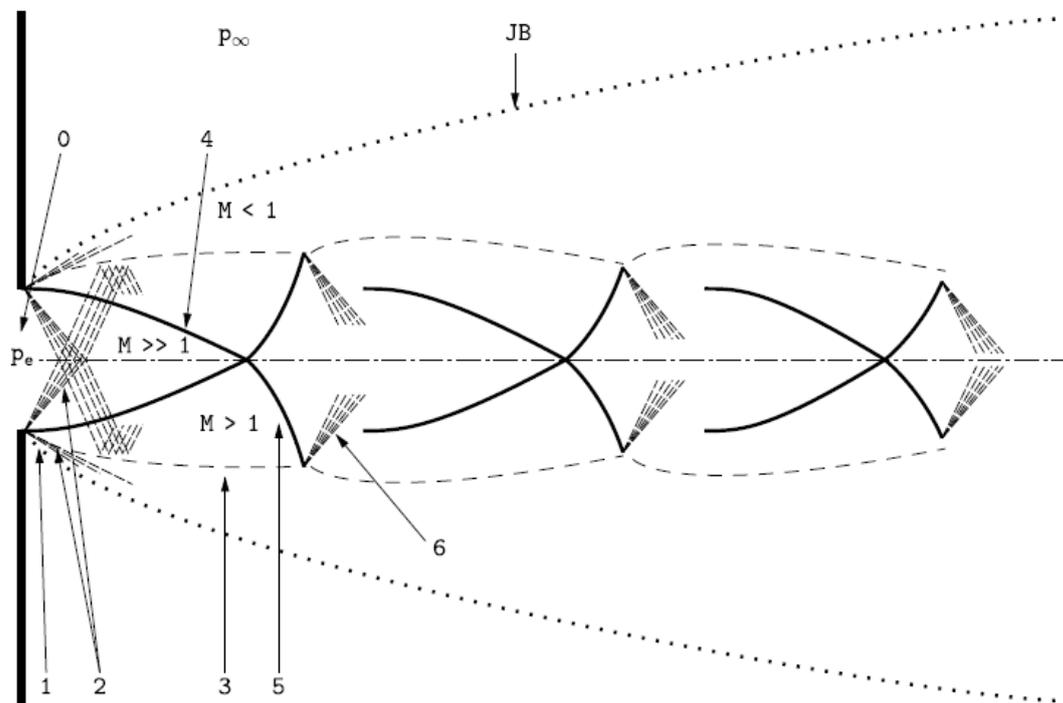


Figura 2.4: Struttura a diamante di un getto moderatamente sottoespanso

Al foro di uscita si ha un'espansione di Prandtl-Mayer, successivamente l'onda acustica incontra le linee a pressione costante dove la pressione è pari a quell'ambiente (zona 3) e vengono riflesse in onde di compressione convergendo verso il centro del getto per creare delle onde di shock oblique (zona 4). Poi l'onda si riflette ancora in una nuova onda obliqua (zona 5) che una volta a contatto con le linee a pressione ambiente dà vita a una nuova espansione che permette di replicare nuovamente la struttura a “X” o “diamante” che ogni volta comporta una sostanziale variazione delle densità del flusso.

Un getto altamente sottoespanso si presenta per casi in cui $4 - 5 \leq \eta_0 \leq 7$ ([19], [20]) e presenta una struttura detta a “botte” o “bottiglia” come in Fig.2.5.

Al crescere della pressione le onde oblique dovute alla riflessione (zona 4) non raggiungono più il centro del getto e danno vita ad una singola riflessione normale all'asse del getto (zona 5) detta disco di Mach. Il punto in cui le onde oblique convergenti, il disco di Mach e le onde riflesse si incontrano è detto punto triplo (zona 6).

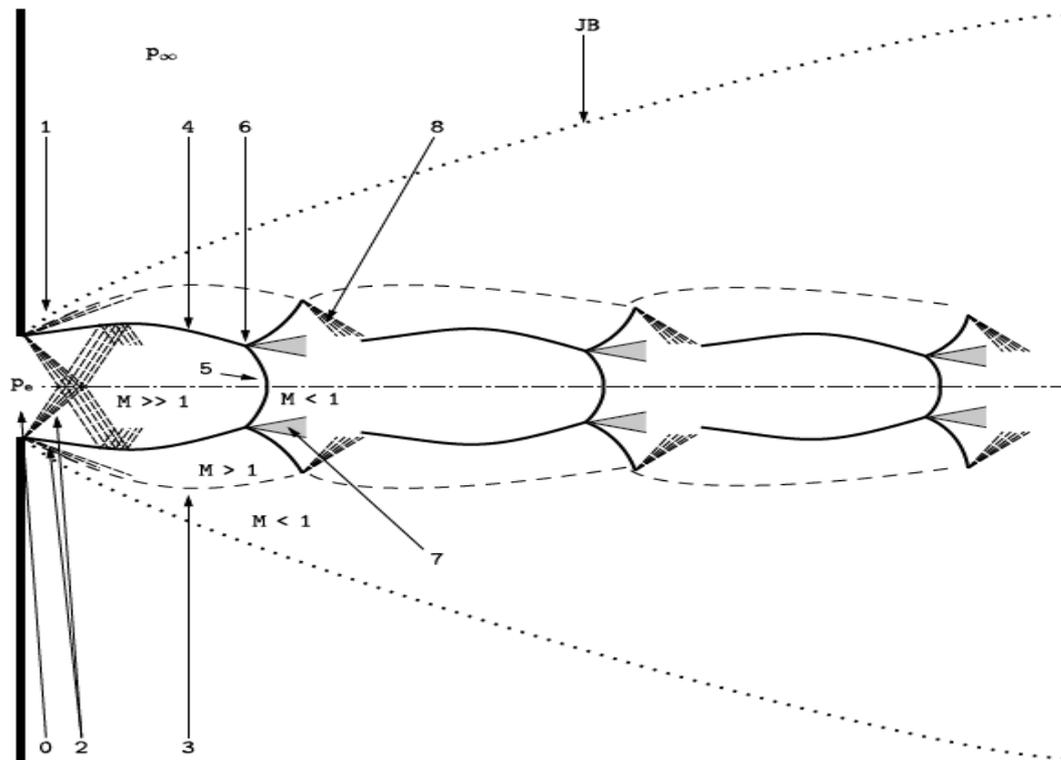


Figura 2.5: Struttura di un getto altamente sottoespanso

Si può ancora notare come il disco di Mach separi una zona supersonica alla sua sinistra con una zona subsonica alla sua destra [21].

Un getto estremamente sottoespanso avviene per $\eta_0 \geq 7$ [20] e presenta a causa di un grosso incremento della pressione una struttura dominata da un'unica cella di shock ed il core è formato da questa unica struttura, impedendo la formazione di ulteriori celle.

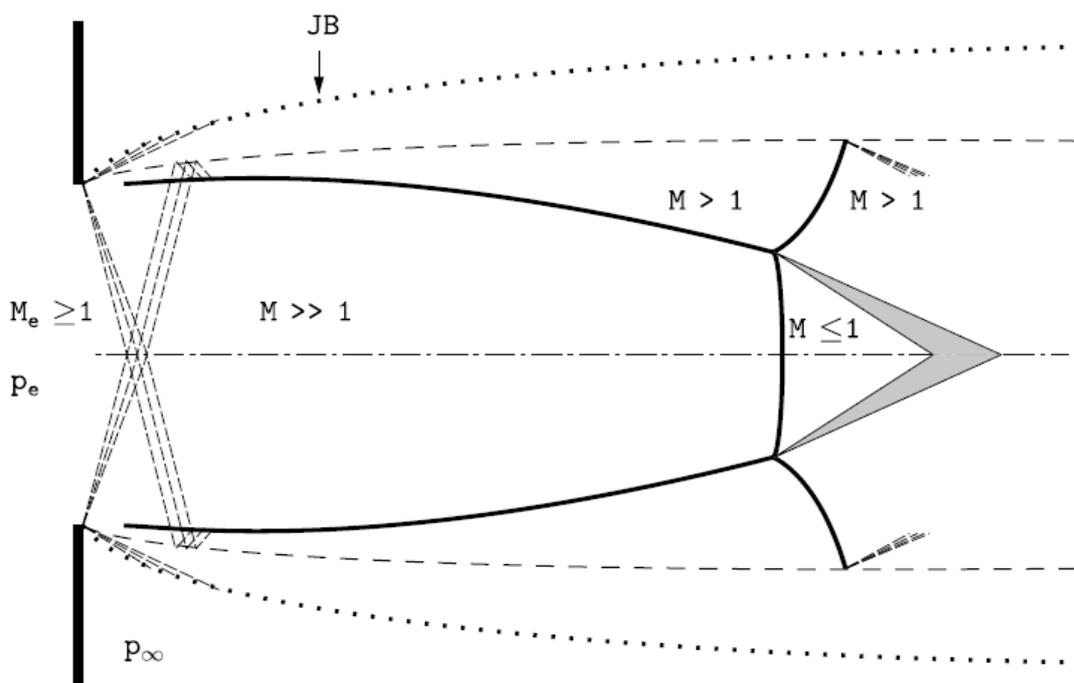


Figura 2.6: Struttura di un getto estremamente espanso

Il diametro totale del getto diminuisce a causa della diminuzione della quantità di moto del fluido dovuta al fenomeno di entrainment con l'ambiente.

All'interno della tesi verranno spesso studiati casi in cui il grado di espansione η_0 si attesta su valori maggiori o uguali a 7. Per questo motivo è importante definire alcuni aspetti del disco di Mach, caratteristica peculiare della struttura del getto.

Come afferma [15] la posizione del disco di Mach è:

- Dominata principalmente dal rapporto di pressioni η_0 ,
- cresce al crescere del numero di Mach,
- è indipendente dal tipo di fluido.

Allora è interessante ricercare una correlazione che espliciti la posizione del disco di Mach in funzione del rapporto di pressioni. In letteratura si possono trovare varie correlazione di questo tipo, ad esempio come suggerito da Rupolo in [22] esiste una correlazione sperimentale in letteratura in grado di dare dei risultati attendibili:

$$L_{MD} = 0.645 \cdot d_{foro} \cdot \sqrt{\eta_0} \quad (2.40)$$

Questa correlazione sarà molto importante per dimensionare la Source Box, punto cardine del metodo "Two-Steps".

2.3 Rilasci incidentali in ambito industriale

Nel paragrafo precedente è stata illustrata la fisica e la modellazione matematica dietro un getto turbolento, di una sostanza pericolosa stoccata ad alte pressioni, dovuto ad un rilascio incidentale. I rilasci di sostanze pericolose in ambito industriale possono essere gassosi, liquidi o in equilibrio tra fase liquida e gassosa e molto spesso derivano da applicazioni in cui la sostanza è ad una pressione maggiore di quella ambiente. I rilasci in forma gassoso sono considerati i più pericolosi in quanto in questo stato la sostanza è più facilmente infiammabile. Rilasci incidentali di questo tipo possono avvenire a causa di:

- errori di progettazione dell'impianto
- eventi esterni
- guasti all'impianto
- variazione non controllata dei parametri fisici del processo
- errori durante il processo di manutenzione ordinaria o straordinaria
- errori operativi

e generalmente i rilasci fisici possono essere classificati come illustrato da [23]:

- *Rottura catastrofica*: il serbatoio in questione rilascia immediatamente tutto il suo contenuto.
- *Rottura "lunga"*: viene a mancare una sezione di tubatura, creando così due diverse sorgenti di rilascio con una sezione pari a quella della tubatura.
- *Tubatura "aperta"*: la parte finale o iniziale della tubatura è del tutto aperta, dando vita ad una sorgente di rilascio con un'area pari a quella del tubo.
- *Rottura "breve"*: la rottura avviene sul lato della tubatura con area minore rispetto ai casi precedenti.

- *Perdita*: avviene tipicamente tramite valvole o pompe ed è localizzata a causa di danni dovuti a erosione o corrosione e sono tipicamente rotture molto piccole.
- *Sfiati o scarichi*: causati da aperture di piccole tubature o valvole.
- *Rilasci operativi*: rilasci necessari al processo di produzione effettuati tramite sistemi controllati.

Nel caso studio sarà esaminato un rilascio di gas mediante la presenza di un foro dovuto a rottura “breve” o perdita come in Fig.2.7.

Per prima cosa è importante determinare:

- P_0 : pressione a cui è stoccato il gas
- P_s : pressione dell’ambiente in cui è rilasciato il gas

in quanto il gradiente tra queste due pressioni determinerà le caratteristiche della fuoriuscita del gas.

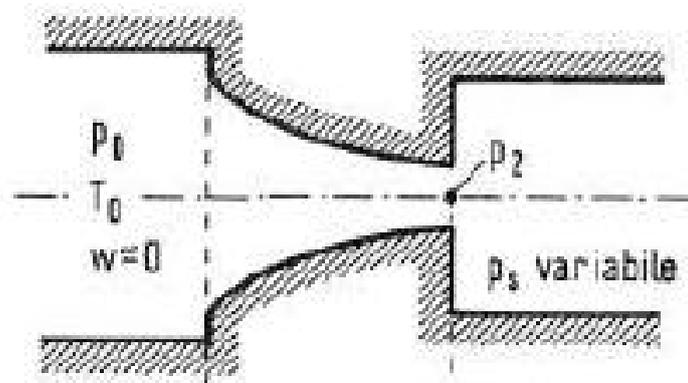


Figura 2.6: Rilascio gassoso da foro [35]

Successivamente è importante determinare il campo di moto in cui ricade il nostro efflusso. Allora possiamo vedere se sussiste la condizione per cui:

$$\frac{P_s}{P_0} \leq R_{crit} \quad (2.41)$$

Dove:

$$R_{crit} = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (2.42)$$

Con γ coefficiente di dilatazione adiabatica del gas.

A questo punto se l'Eq. 2.41 è valida il gas si trova in regime sonico, detto anche caso critico, viceversa la sostanza si trova in regime subsonico. La sostanza rimarrà nel caso critico fino a che la condizione espressa dall'Eq. 2.41 sarà vera e la pressione di uscita locale nel foro sarà pari a:

$$P_2 = R_{crit} \cdot P_0 \quad (2.43)$$

$$\rho_2 = \rho_0 \left(\frac{P_2}{P_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \quad (2.44)$$

Da qui è possibile determinare la portata dell'efflusso, che in caso critico si attesta su un valore massimo detto di massa critica definito come:

$$G = \rho_2 \cdot C_D \cdot A \cdot c_S \quad (2.45)$$

dove:

- ρ_2 : è la densità del gas in condizioni critiche
- C_D : coefficiente di vena fluida
- A : area del foro
- c_S : velocità del fluido in condizioni critiche

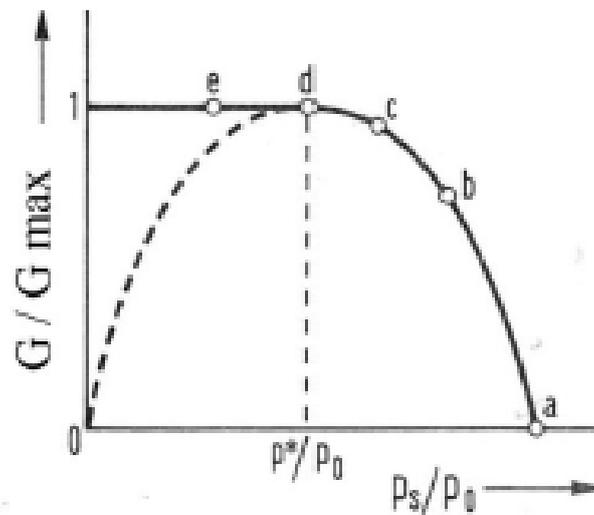


Figura 2.7: Andamento della portata al variare della pressione di sbocco

3. Metodologia

All'interno di questo terzo capitolo si entrerà nel cuore operativo della tesi.

Inizialmente verranno presentati due diversi approcci per lo studio del problema, ovvero i modelli empirici, ancora largamente usati, e la CFD che oggi sempre più si fa strada nella modellizzazione di questi problemi ed è sempre più usate non solo in ambito di ricerca ma anche in ambiente lavorativo. Sarà trattato l'approccio CFD "Two-Steps" utilizzato per lo studio di un rilascio di gas pressurizzato in ambiente necessario per definire gli obiettivi di questa tesi a conclusione del capitolo.

Successivamente verrà fatto un sunto dei lavori precedenti in modo da esporre quelle che sono le basi da cui parte questo lavoro in modo da spiegare il perché della evoluzione che lo ha accompagnato.

A seguire verranno introdotti i parametri che si è deciso di studiare per la caratterizzazione della Source Box e quali sono state le simulazioni svolte durante lo sviluppo temporale del lavoro.

3.1 Caso studio e modelli numerici

Prima di descrivere i modelli usati per risolvere questo fenomeno bisogna esporre il caso di studio su cui si è lavorato all'interno di questa tesi. Il caso studio iniziale è stato ereditato da alcune tesi precedenti ([22],[24], [25], [26], [27], [28]) e si tratta di un rilascio incidentale di gas metano compresso da una pipeline di un piano di produzione di una piattaforma offshore.

Il caso iniziale presenta:

- $P_{stoc} = 10 \text{ bar}$
- $d_{foro} = 1 \text{ cm}$

Per trattare questa tipologia di problemi si possono usare due differenti approcci numerici:

- Modelli empirici
- Modelli CFD

I modelli empirici sono la soluzione più semplice ed immediata per la risoluzione di questo problema e permettono di dare subito il via ad un'analisi delle conseguenze permettendo un calcolo veloce delle aree a rischio coinvolte nel rilascio incidentale. Questi metodi nascono precedentemente rispetto ai metodi computazionali e permettono quindi con costi di calcolo molto modesti di avere dei risultati; ma d'altro canto questi metodi sono sviluppati per essere fortemente conservativi inducendo ad un sovradimensionamento durante la fase di design delle strutture atte al contenimento del rilascio. Bisogna inoltre considerare che i modelli empirici, essendo sviluppati tramite processo sperimentale, sono limitati ai soli casi di studio e non espandibili a nuovi problemi. Alcuni metodi empirici hanno inoltre delle importanti limitazioni. Come il *Turbulent Free Jet model*, atto al nostro caso studio, che risulta però valido solo per getti liberi, assunzione non sempre realistica in ambienti congestionati come quelli industriali, e descrive un getto turbolento completamente sviluppato.

Il secondo approccio, quello costituito dai modelli CFD, risulta più utile per il caso studio che si è deciso di analizzare, in quanto è possibile modellare sia fenomeni macroscopici che microscopici. Oltretutto si tratta di modelli maggiormente adattabili ai propri casi di interesse.

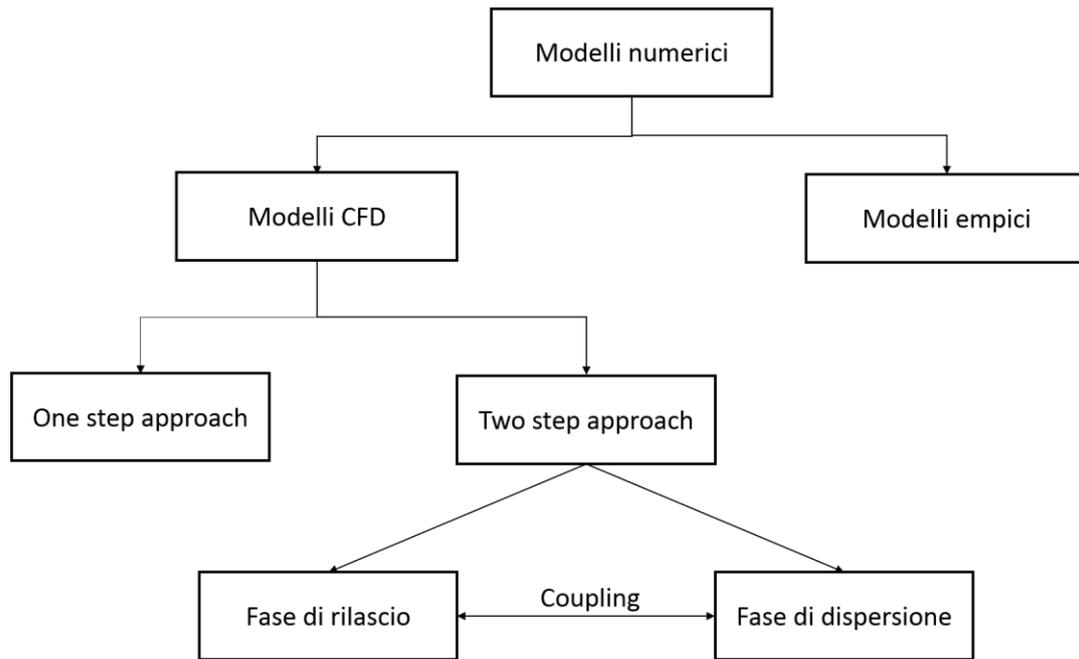


Figura 3.1: Schema riassuntivo dei modelli utilizzabili

All'interno dei modelli CFD il problema di interesse per questa tesi può essere eviscerato seguendo due diversi cammini:

- Approccio “One-step”
- Approccio “Two-Steps”

Come suggerito da ([29], [30]) nel caso di interesse di questa tesi il modello “Two-Steps” risulta essere più conveniente, in quanto il rilascio nei pressi del foro e la dispersione della nube di inquinante hanno una diversa scala temporale e geometrica rendendo difficile impostare un'unica simulazione per entrambi i fenomeni. Sarà quindi necessario settare due diverse simulazioni per le due diverse fasi in questione:

- Fase di rilascio
- Fase di dispersione

Nella prima assistiamo alla fuoriuscita di un gas che presenta effetti di comprimibilità e campo di moto supersonico, strettamente correlate alla pressione di stoccaggio. Mentre nella seconda fase il fluido ha velocità molto più basse ed è equibarabile ad un gas incomprimibile.

Questo discorso coinvolge anche la diversa griglia di calcolo che bisognerà usare nelle due diverse fasi. Le celle della griglia di calcolo da utilizzare per analisi CFD devono avere dimensione comparabile a quella del fenomeno che si vuole modellizzare. È dunque chiaro come non può esserle la stessa avendo il fenomeno delle scale spaziali diverse.

Come esposto da A. Moscatello in [28] possiamo vedere con quale paradigma lavora il metodo “Two-Steps”:

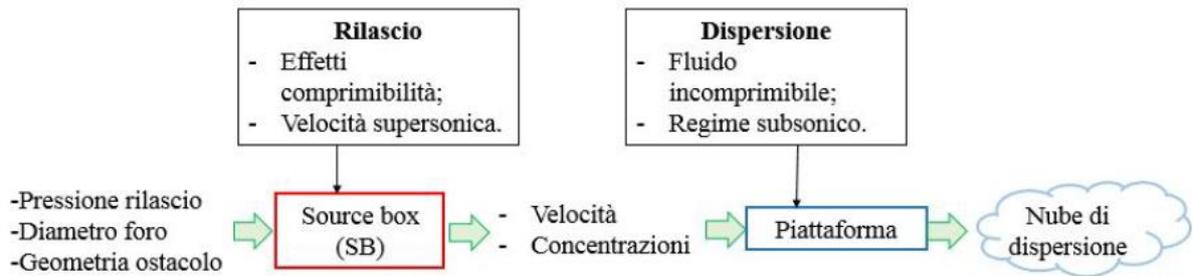


Figura 3.2: Flow chart del metodo “Two-steps” [28]

È importante per il futuro svolgimento di questo lavoro sottolineare come le simulazioni della prima fase fungano da input per le simulazioni che modellano la seconda fase del fenomeno che portano infine a definire le aree di danno.

Questa tesi sarà focalizzata nello studio inerente la fase di rilascio.

3.1.1 Source Box

La prima fase dell’approccio “Two-Steps”, quella del rilascio, viene modellata all’interno di un modello detto “Source Box” come definito da Guasco e Pederiva in [24] e [25]. All’interno di questo dominio viene modellato un rilascio di gas soggetto ad effetti di comprimibilità in campo supersonico.

Poiché il caso studio deriva da un efflusso accidentale da una pipeline si può ragionevolmente presumere che questa faccia parte di un fascio di tubi in parallelo, quindi all’interno del dominio è considerato un’ostacolo di forma cilindrica su cui il getto va ad urtare mentre è ancora in regime sonico.

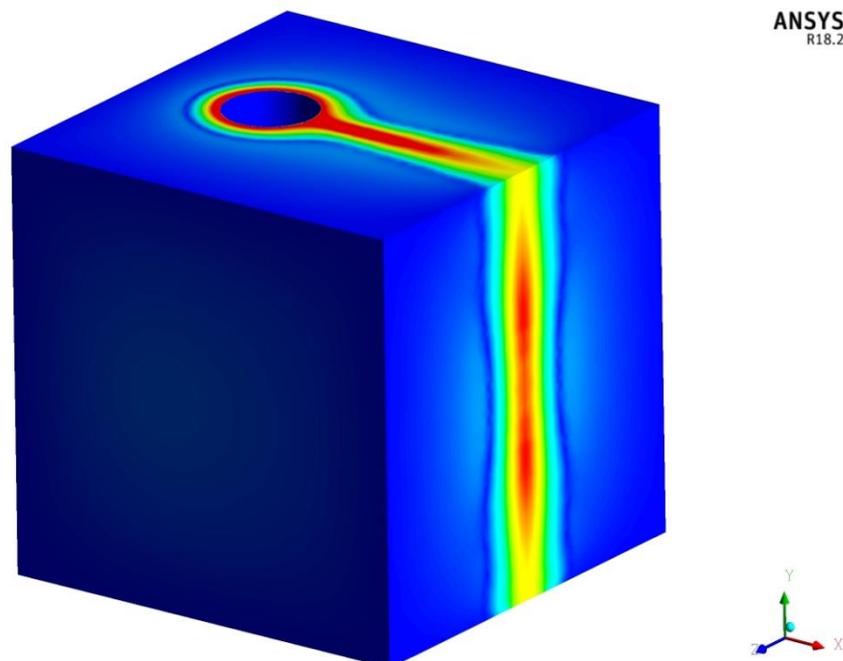


Figura 3.3: Dominio della fase di rilascio, detto “Source Box”.

La forma della Source Box è stata precedentemente assunta cubica [26], mentre la dimensione è stata suggerita da H. Wilkening et al. [30]. Quest’ultimo parametro è determinante per il funzionamento del metodo adottato, in quanto bisogna assicurarsi di esaurire tutti i fenomeni

legati alla comprimibilità del fluido all'interno della Source Box. Allora la dimensione della Source Box è assunta come:

$$L_{SB} = 10 \cdot 0.645 \cdot d_{foro} \cdot \sqrt{\eta_0} \quad (3.1)$$

ovvero dieci volte la posizione in cui è localizzato il primo disco di Mach formato dal fluido, quindi possiamo vedere come la dimensione della Source Box dipenda esclusivamente da:

- Dimensione del foro
- Rapporto di pressioni tra stoccaggio e valle

Come esposto da T.Corti in [26] la Source Box è definita da alcuni parametri:

- Pressione di rilascio
- Diametro foro
- Tipologia ostacolo
- Diametro ostacolo
- Distanza tra ostacolo e punto di rilascio
- Direzione dell'efflusso

Tutti questi parametri condizioneranno la distribuzione di due grandezze peculiari del fenomeno sulle pareti della Source Box:

- Il campo di velocità
- La frazione massica della sostanza pericolosa

Queste grandezze diverranno input della simulazione di dispersione.

Questa tesi sarà quindi improntata a studiare e comprendere come variando i parametri caratteristici della Source Box possano cambiare le grandezze significative del problema che verranno utilizzate per studiare la dispersione ed infine le aree di danno del fenomeno incidentale. Un altro fine di questa tesi è dare vita ad una libreria di "Source Box" che possa permettere di ottenere dei dati di input per la fase di dispersione senza la necessità di svolgere la simulazione di rilascio.

3.1.2 Coupling e dispersione

La seconda fase, quella di dispersione, è utile a modellare come si sviluppa la nube di gas che si origina dal rilascio di gas.

L'efflusso ha ormai esaurito tutti i fenomeni di comprimibilità e il gas è ora assunto come un fluido incomprimibile, in cui la velocità del vento condiziona fortemente lo sviluppo del plume di gas e le aree coinvolte durante il rilascio.

La geometria presa in considerazione è un modello semplificato di un solo piano, quello intermedio di produzione, di una piattaforma offshore. Il piano è aperto lateralmente e soggetto alla presenza di vento, ma chiuso sopra e sotto da una pavimentazione. Le dimensioni del dominio sono state assunte come seguenti:

Tabella 3.1: Dimensioni del dominio di dispersione

Dimensioni dominio	
Larghezza [m]	30
Lunghezza [m]	20
Altezza deck [m]	5

Per interfacciare la fase di rilascio e quella di dispersione è necessario un accoppiamento sviluppato da A. Moscatello (28) e detto “coupling”. Questo è necessario per fornire alla simulazione di dispersione una distribuzione spaziale dei profili di velocità della miscela e della frazione massica di CH_4 derivanti dalla simulazione di rilascio. Questo per evitare di usare come dati di input dei valori medi e quindi inficiare la precisione della simulazione, in questo modo si cerca di simulare una situazione più reale possibile, soprattutto perché è possibile così rilevare dove sono i valori di picco di presenza di gas pericoloso ed evitare di sottostimare le precauzioni da adottare in fase di design o di mitigazione.

3.1.3 Solver fluidodinamico

Per la realizzazione dei modelli computazionali che verranno presentati in questa tesi sarà necessario come primo passo scegliere il solver fluidodinamico da utilizzare. Esiste una vasta scelta di software atti alle simulazioni fluidodinamiche, si hanno sia software commerciali presenti nel mercato da lungo tempo sia software open source, è possibile scegliere sia programmi adatti a qualsiasi applicazione come alternative specifiche in base al fenomeno.

La scelta del team di ricerca è caduta sull’utilizzo del software commerciale ANSYS Fluent, integrato nell’ambiente ANSYS ormai da svariati anni, leader nel settore industriale e una delle maggiori opzioni in campo accademico.

Il software Fluent ha ampie capacità fisiche di modellazione necessarie per modellare il flusso di un fluido, i fenomeni di turbolenza, il trasferimento di calore e altro per qualsiasi applicazione industriale. Fluent offre inoltre modelli di calcolo stabili e robusti e ad alte prestazioni in modo da risolvere analisi CFD complesse e di grandi dimensioni in modo rapido e con un contenuto costo computazionale.

In questo lavoro sarà utilizzato una licenza ANSYS Academic per la versione ANSYS 18.2.

3.2 Cenni ai lavori passati

Come è stato spiegato precedentemente l’approccio “Two-Steps” permette di studiare il fenomeno incidentale in due fasi distinte. In questo paragrafo vedremo come è nato e come si è sviluppato lo studio del primo step, ovvero la fase di rilascio tramite il concetto di Source Box.

All’interno del lavoro di ricerca del SEADOG la proposta di sdoppiare il fenomeno e la prima proposta di Source Box deriva dai lavori di S. Guasco e E. Pederiva ([24],[25]). La Source Box è stata dimensionata a forma di parallelepipedo, l’Eq. 3.1 è stata usata per determinarne la profondità. Al contrario la faccia in cui si ha il foro è stata dimensionata di forma quadrata con dimensione arbitraria, in quanto si è probabilmente supposto fosse una dimensione più che sufficiente a esaurire gli effetti di comprimibilità che sono minori lateralmente a causa della direzionalità del getto. Il rilascio è stato ipotizzato tramite un foro all’interno del dominio.

Con il lavoro T. Corti [26] l’autore propone di utilizzare una forma cubica per la Source Box dimensionata con il valore L_{SB} come proposta anche da A. Uggenti et al. in [32]. Sempre [26] ha poi deciso di spostare il foro del rilascio all’estremità della Source Box, in modo da ridurre il dominio necessario e di conseguenza il costo computazionale delle simulazioni.

Successivamente è stato svolto il lavoro di C. Rupolo [22] che tramite l’introduzione di un ugello convergente anteriore al foro ha permesso di visualizzare in maniera soddisfacente la struttura caratteristica di un getto sottoespanso, che non si era potuta rilevare in T.Corti [26].

Il lavoro di T. Corti [26] ci lascia inoltre una base importante per lo sviluppo di questa tesi. In quanto l’autore da una classificazione dei parametri che potrebbero influenzare lo sviluppo del getto all’interno della Source Box. In seguito ha svolto un’analisi per trovare quelli più

significativi in modo da ridurre il numero di Source Box da studiare e gettando le basi per l'analisi di sensitività svolta in questa tesi. Sono stati identificati i seguenti parametri:

- Pressione di rilascio
- Diametro del foro
- Relazione tra la dimensione dell'ostacolo e la distanza tra l'ostacolo e il getto
- Direzionalità del getto.

Allora in [22] è stato definito un caso studio base tramite i seguenti parametri:

- $P_{ril} = 10 \text{ bar}$
- $d_{foro} = 1 \text{ cm}$ [33]
- Ostacolo cilindrico
- $d_{cyl} = 10 \text{ cm}$
- Distanza tra foro e centro del cilindro $l = 15 \text{ cm}$

Dando vita alla seguente geometria:

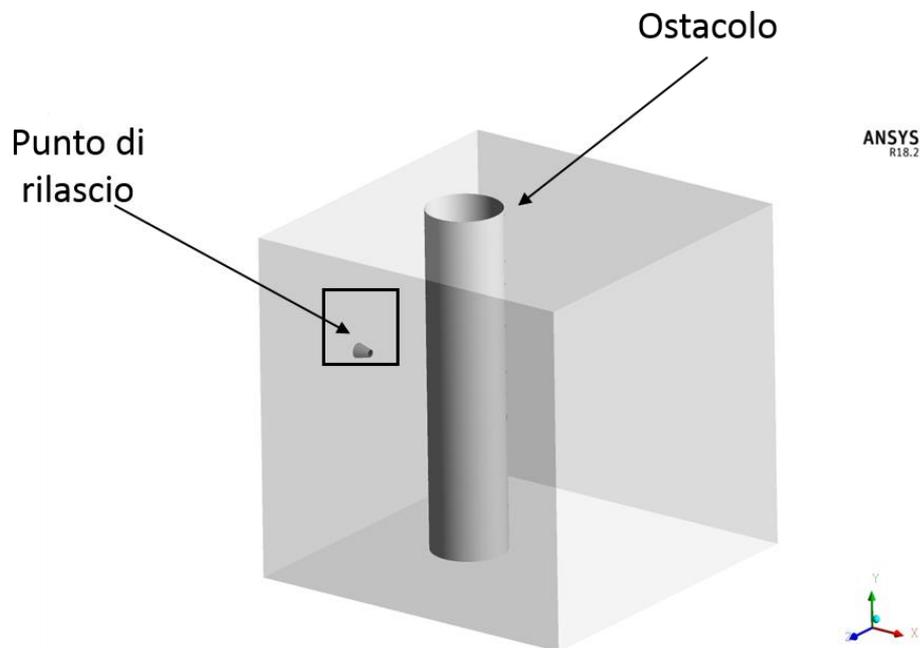


Figura 3.4: Modello CAD utilizzato per rappresentare la “Source Box”[19].

Questo è il caso base da cui parte il nostro lavoro.

3.3 Parametro A e nuove proposte

È obiettivo di questa tesi caratterizzare i parametri che influenzano la Source Box in modo da arrivare al minor numero di casi da studiare e avere un modello adatto a più situazioni possibili. Infatti, l'obiettivo è capire come vengono influenzate la velocità e la frazione massica di CH_4 del getto dai parametri elencati nel paragrafo precedente.

Per iniziare questo lavoro si è partiti dalla proposta di T. Corti [26] di analizzare un parametro che relaziona il diametro del cilindro con il diametro del getto:

$$A = \frac{d_{jet}}{d_{cyl}}$$

ove:

- d_{jet} : diametro del getto nella sezione di impatto con il cilindro
- d_{cyl} : diametro del cilindro

Dopo alcune riflessioni si è notata la difficoltà di definire d_{jet} in quanto il getto, essendo estremamente sottospanso, non presenta un andamento marcatamente conico, dunque non è definibile geometricamente. Inoltre, in letteratura sono presenti numerose correlazioni per calcolare il diametro massimo di un getto, indipendentemente dalla posizione, ma non è plausibile supporre che d_{jet} sia anche il diametro massimo del getto, a causa della vicinanza tra foro e cilindro.

Dunque per cercare di indagare l'influenza che hanno i fattori geometrici sulla Source Box si è deciso di intraprendere uno studio coinvolgendo i seguenti parametri:

- d_{foro}
- d_{cyl}
- l

Questo studio ha cercato di mantenere una similitudine geometrica. Ovvero si è deciso di far variare il diametro del cilindro mantenendo le seguenti condizioni:

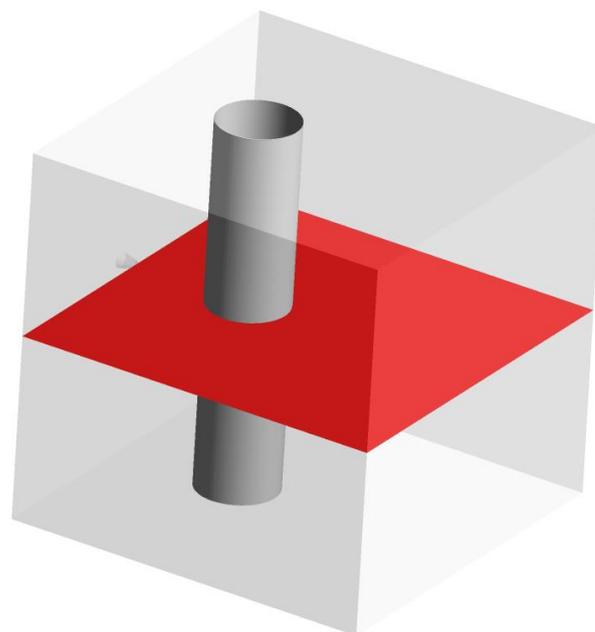
- $\frac{d_{foro}}{d_{cyl}} = 10$
- $\frac{l}{d_{cyl}} = 1.5$

derivanti dal caso base, dando via ad uno studio denominato dei “3 fattori”.

Poiché si è notato che il piano di mezzeria longitudinale:

- Contiene i 3 parametri coinvolti, ovvero d_{foro}, d_{cyl}, l
- È più rappresentativo in quanto il getto ha la massima apertura in esso,

in quanto è il piano che si sviluppa orizzontalmente rispetto all'asse del foro di rilascio; di conseguenza si è deciso di studiare il fenomeno tramite un dominio bidimensionale.



ANSYS
R18.2
Academic

Figura 3.5: Piano di mezzeria longitudinale

3.4 Simulazione 2D

A questo punto si è reso necessario impostare una simulazione bidimensionale del caso base di partenza.

3.4.1 Geometria

Il problema fisico che coinvolge il getto presenta una simmetria assiale [21], questa ci ha permesso di dividere il dominio desiderato a metà in modo da ridurre il tempo computazionale necessario per la simulazione e avere la seguente geometria:

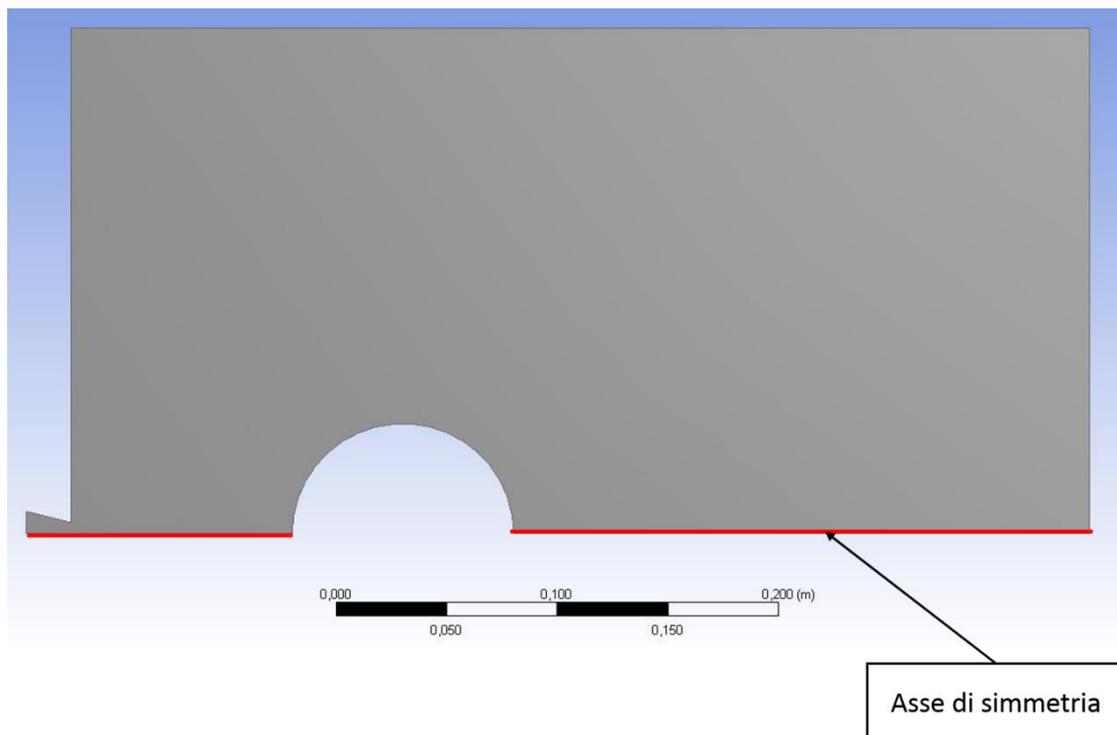


Figura 3.6: Modello CAD per la "Source Box" in un caso bidimensionale

In questo caso di partenza, la Source Box è stata dimensionata considerando un foro pari ad 1 cm e una pressione di rilascio pari a 50 bar, di conseguenza la dimensione caratteristica della Source Box è pari a ~ 0.46 m. La pressione di 50 bar è stata considerata per permettere al flusso a valle dell'ostacolo di essere completamente sviluppato.

Per modellare la geometria, visto la semplicità di essa, è stato usato il software interno ad ANSYS, Design Modeler Tool.

3.4.2 Mesh o griglia di calcolo

Uno dei punti focali nella impostazione di una corretta simulazione CFD è la realizzazione di una mesh o griglia di calcolo, in quanto nelle celle che la compongono verranno risolte le equazioni peculiari del problema fisico. Tramite una corretta impostazione della mesh è possibile modellare i fenomeni fisici caratteristici e velocizzare i tempi di risoluzione.

Per realizzare la mesh è stato utilizzato ANSYS Meshing, strumento integrato nell'ambiente ANSYS, utile per la costruzione di griglie di calcolo per svariate applicazioni fisiche. ANSYS Meshing è quindi in grado di realizzare una mesh ai volumi finiti [36], fondamentale per la risoluzione di problemi di fluidodinamica computazionale.

Per realizzare questa mesh è stata scelta una mesh “strutturata” [44]. Questa scelta è stata adottata poiché questo tipo di mesh è particolarmente adatta per flussi fortemente direzionati e permette una più facile convergenza della soluzione [37]. In seguito sono stati realizzati alcuni infittimenti interni alla mesh per modellizzare le zone più critiche del dominio, come la zona in cui è collocato il disco di Mach o la zona prossima alla parete del cilindro. È bene soffermarsi su quest’ultimo infittimento; tramite il software utilizzato è stata adottata l’opzione “Inflation Layer” utile a creare una mesh adatta a risolvere il fenomeno di strato limite a parete descritto nel paragrafo 2.1.3 “Interazione fluido ostacolo”.

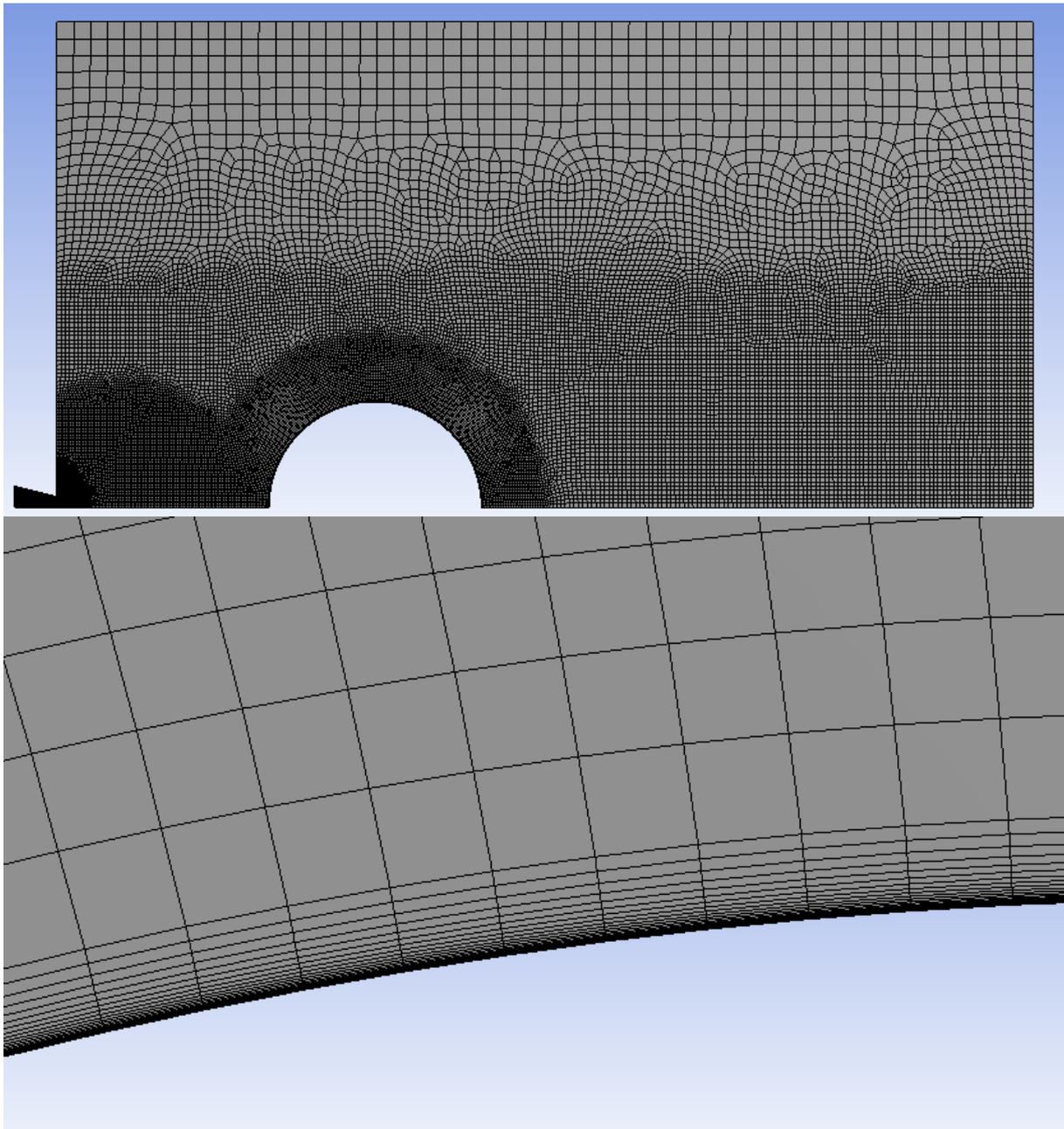


Figura 3.7: Mesh utilizzata e dettagli della zona di strato limite

Per verificare la qualità della mesh realizzata sono stati esaminati i seguenti parametri:

- Skewness angle
- Aspect ratio
- Orthogonal quality

Sono stati ottenuti i seguenti risultati:

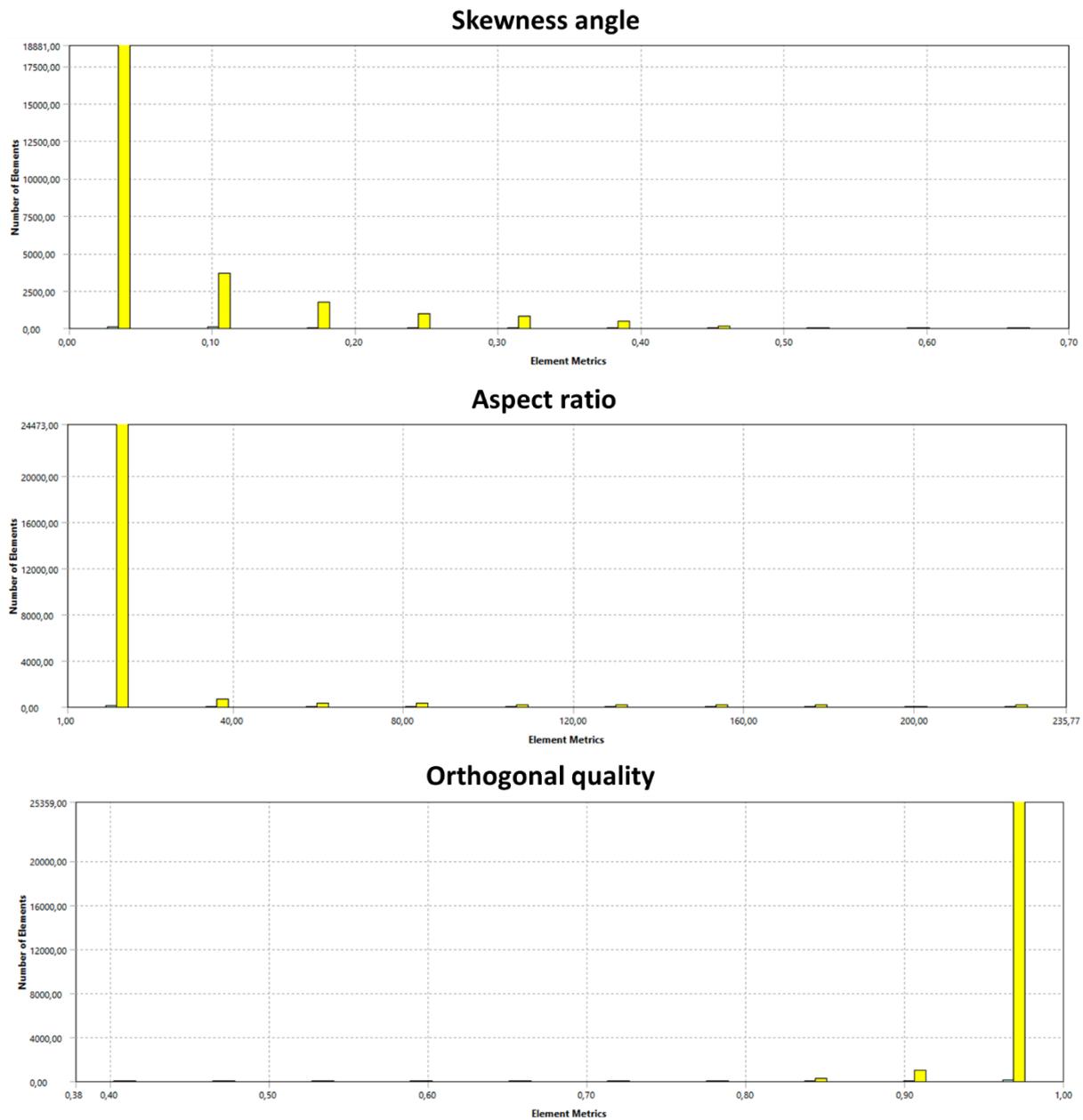


Figura 3.8: Monitor dei parametri per il controllo della qualità della mesh

I valori di target per la realizzazione di una buona mesh sono i seguenti:

- Skewness angle $\sim 0^\circ$
- Aspect ratio ~ 1
- Orthogonal quality ~ 1

e come è possibile vedere dalla Fig. 3.8, la mesh implementata ha valori che tendono alle norme di buona pratica, confermando la qualità della griglia di calcolo implementata.

Invece per assicurarci di aver modellizzato in maniera appropriata lo strato limite che si sviluppa sull'ostacolo cilindrico bisogna monitorare il valore:

$$y^+ = \frac{u_* y}{\nu}$$

dove:

- u_* : velocità del fluido nella prima celle a parete
- y : altezza della prima cella a parete
- ν : viscosità cinematica del fluido

Il valore che si è scelto di ottenere è: $y^+ \approx 5$, come è possibile vedere in Fig.3.9, in questo modo è possibile risolvere numericamente lo strato limite a seconda del modello di turbolenza utilizzato [13].

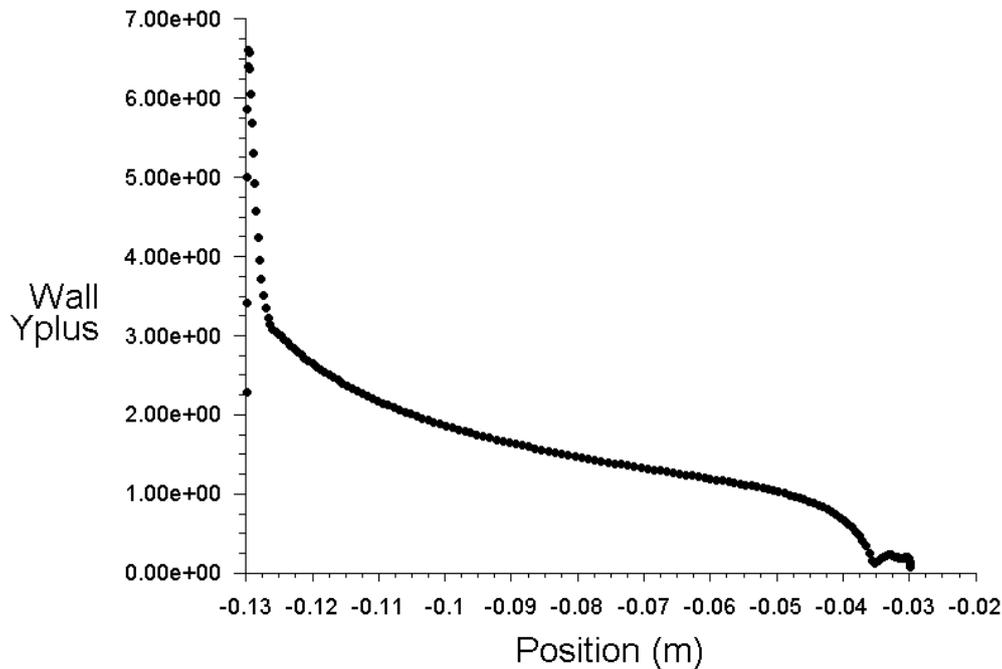


Figura 3.9: Valore di y^+ sulla parete dell'ostacolo

3.4.3 Setup di Fluent

Ora è necessario esporre come è stato svolto il setup della simulazione all'interno di Fluent in modo da comprendere le assunzioni fisiche imposte.

Il primo passo consiste nel settaggio del solver, dove abbiamo considerato il fenomeno come stazionario e assialsimmetrico, inoltre è stato impostato un solver "*Pressure-Based*" [42] maggiormente adatto alle applicazioni coinvolte in questo studio [38].

È stata abilitata l'equazione dell'energia per modellare lo scambio termico dovuto a:

- Conduzione
- Diffusione
- Dissipazione viscosa
- Sorgenti esterne

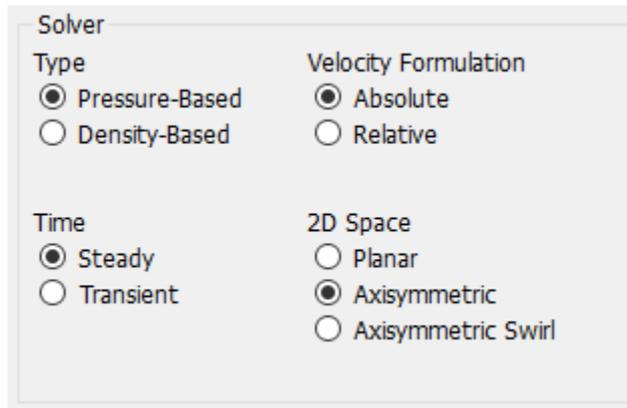


Figura 3.10: Setup del solver

Il nostro caso prevede un flusso di una miscela composta da aria e metano. Per questo motivo è stato selezionato il modello “*Species Transport*” che risolve l’equazione di conservazione delle specie in gioco. L’aria è stata considerata come una miscela di solo ossigeno e azoto.

È stato poi necessario scegliere un modello di turbolenza atto a modellare il nostro fenomeno, ovvero un modello matematico che permetta la rappresentazione degli effetti di turbolenza sulla fluidodinamica del getto. In letteratura è ampia la scelta di modelli di turbolenza adatti a risolvere le equazioni di Navier-Stokes.

La scelta è ricaduta sul modello $k - \omega$ SST [39]. Si tratta di un modello a 2 equazioni [41] in cui:

- k : energia cinetica turbolenta
- ω : rateo di dissipazione specifico dell’energia cinetica

È un modello derivato dal modello $k - \omega$ [40] in cui viene modellato il trasporto dovuto agli stress di taglio (SST). Questo modello permette una buona modellazione dello strato limite del flusso ed è consigliato per applicazioni con forti gradienti di pressione e fenomeni di separazione di flusso.

Successivamente è stata settata l’opzione “*Viscous Heating*” come consigliato da [38].

In seguito, è stato necessario settare le condizioni al contorno del problema e si è deciso di operare nella seguente maniera:

Tabella 3.2: Elenco delle condizioni al contorno imposte

Regione fisica	Boundary condition
Parete ugello	Wall
Parete cilindro	Wall
Ingresso ugello	Pressure inlet
Asse di simmetria	Axis
Parete frontale al foro	Pressure outlet
Parete nell’asse del foro	Pressure outlet
Parete laterale	Pressure outlet

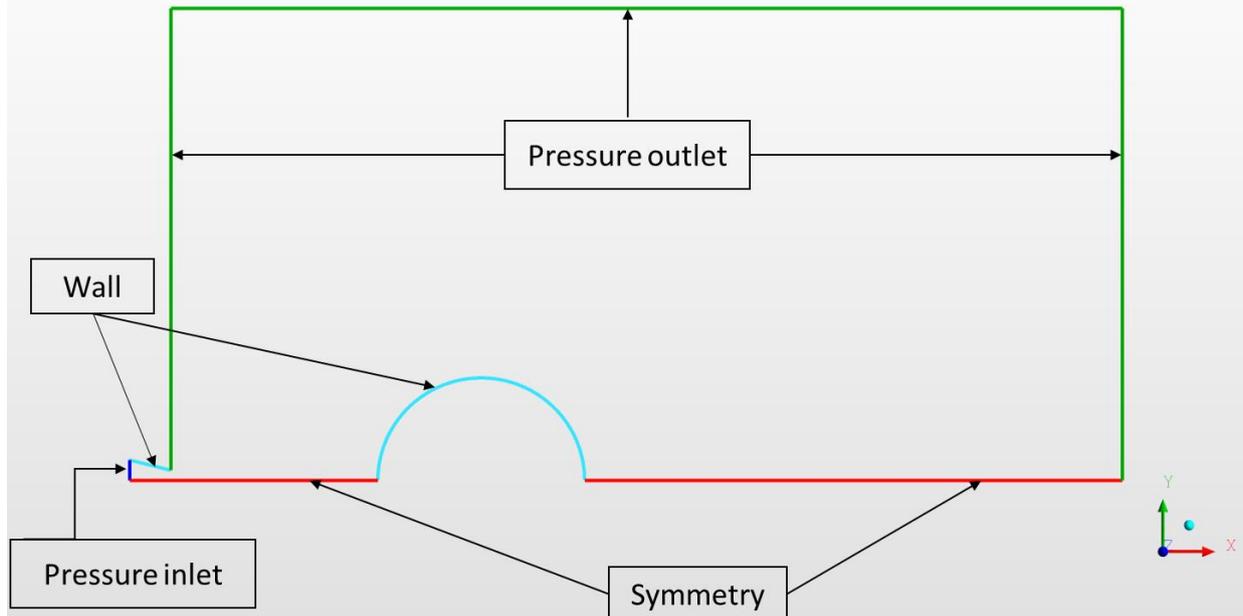


Figura 3.11: Condizioni al contorno nel caso 2D

Successivamente è stato settato lo schema numerico di risoluzione nel seguente modo indicato in Fig.3.12:

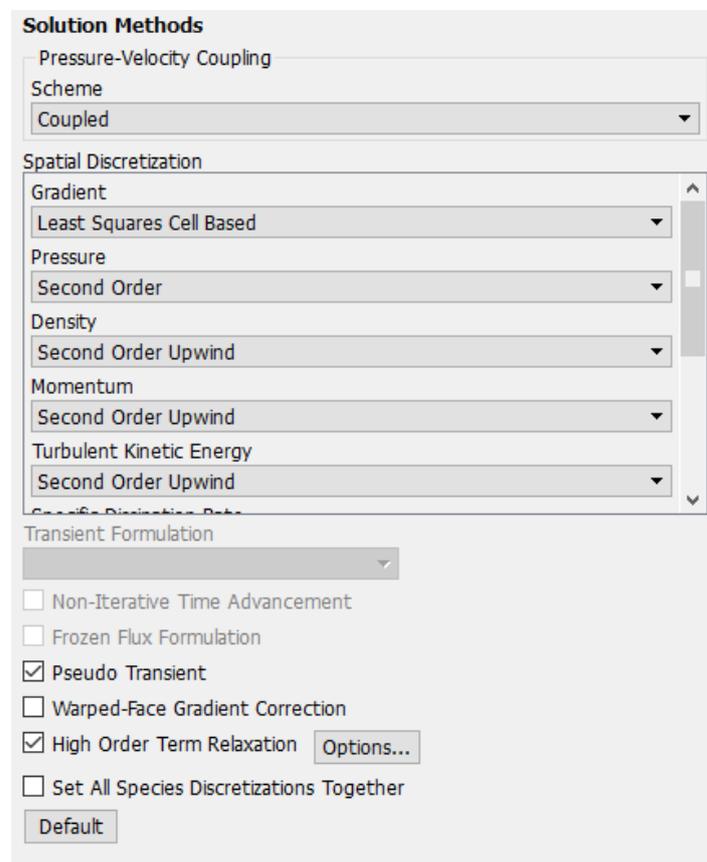


Figura 3.12: Setup dello schema numerico della simulazione

Tra le impostazioni da sottolineare vi è:

- l'uso di uno schema numerico "coupled", utilizzato per risolvere in maniera accoppiata le equazioni di velocità e pressione,
- il calcolo delle variabili tramite lo schema "upwind" di secondo ordine
- l'utilizzo del metodo "Pseudo Transient", un algoritmo che risolve il problema in forma stazionaria tramite l'utilizzo di under-relaxation factor, utili a migliorare la convergenza della simulazione.

A questo punto la simulazione è stata inizializzata e avviata con il seguente approccio:

- ~ 1000 iterazioni tramite schema upwind di primo ordine
- ~ 6000 iterazioni tramite schema upwind di secondo ordine

questo per assicurare una più veloce convergenza della soluzione numerica.

A conclusione della simulazione si è verificata la convergenza numerica della soluzione tramite:

- Visualizzazione dei residui
- Monitor della velocità del flusso sulla faccia frontale al foro
- Monitor della frazione massica di CH₄ sulla faccia frontale al foro

Come si può vedere nelle Fig.3.13-3.15 la simulazione ha raggiunto una buona convergenza numerica del problema.

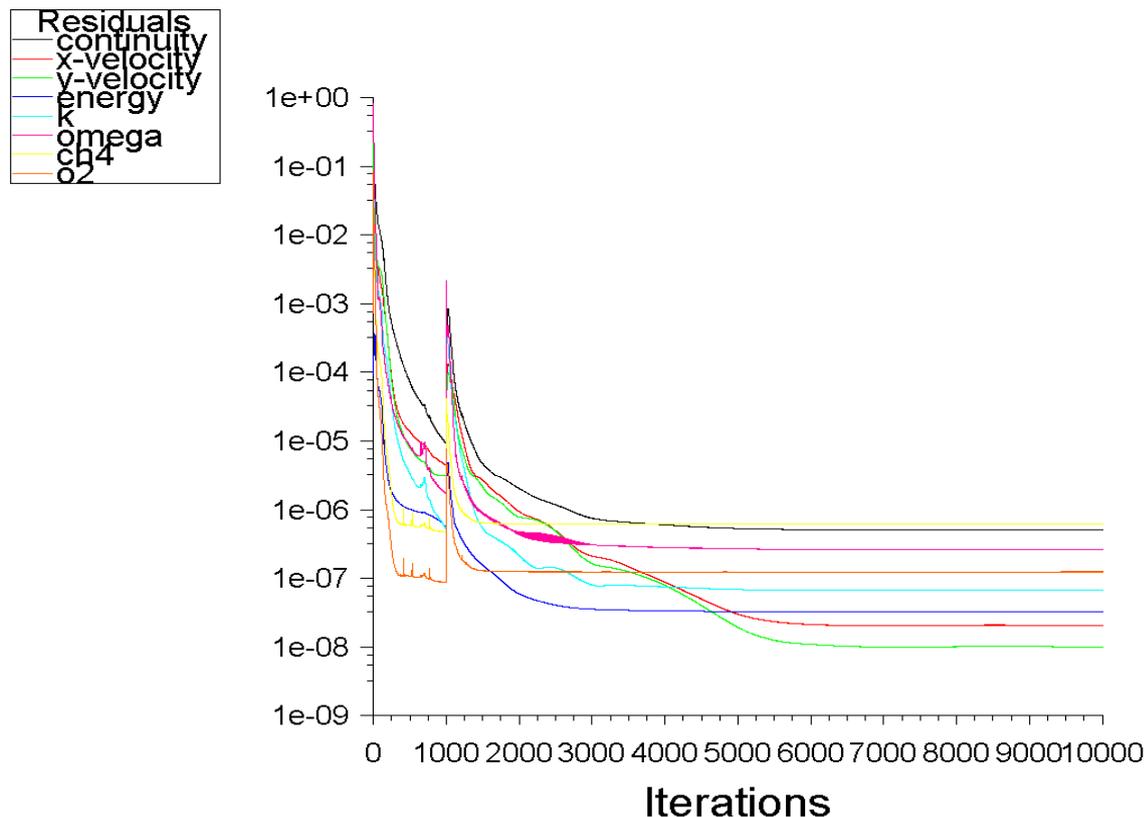


Figura 3.13: Andamento dei residui della simulazione

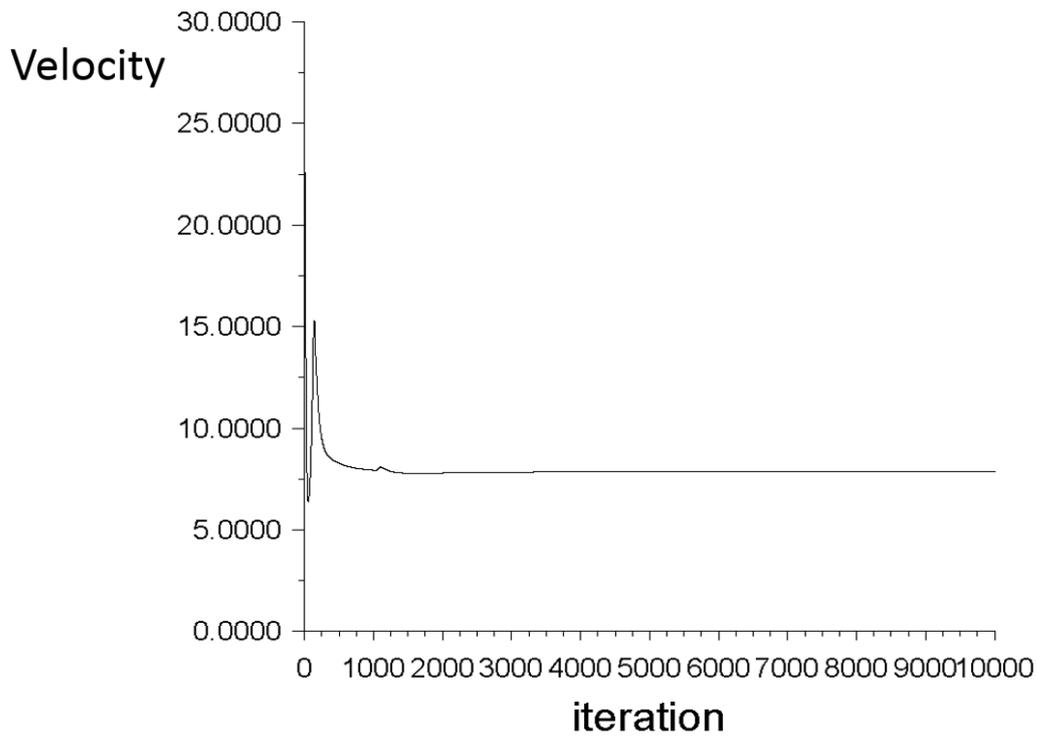


Figura 3.14: Monitor della velocità di flusso sulla faccia frontale al foro.

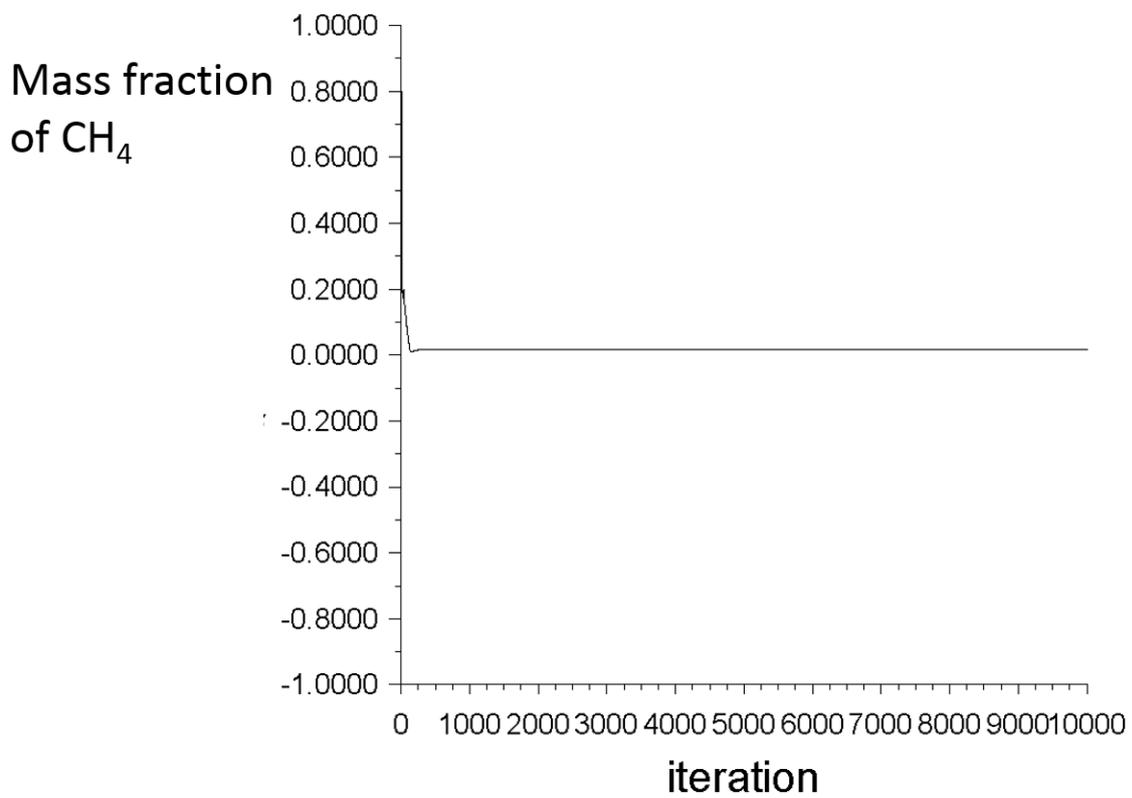


Figura 3.15: Monitor della frazione massica di CH₄ sulla faccia frontale al foro

È possibile vedere come dopo un certo numero di iterazioni i residui e le grandezze fisiche di interesse hanno raggiunto dei valori stabili.

3.4.5 Studio di grid independence in geometria 2D

Un passo fondamentale per attestare la qualità di una simulazione CFD è svolgere uno studio di grid independence.

Questo processo consiste nel rendere la simulazione numerica indipendente dalla griglia di calcolo, ovvero trovare una configurazione in cui raffinando ulteriormente la mesh il risultato numerico non cambi più in maniera significativa. Questo ci permette di trovare un valore limite di raffinamento della nostra mesh che ci dia un risultato fisico realistico con un costo computazionale accettabile in modo da usare la risorsa di calcolo in maniera ottimale.

È stato quindi svolto uno studio di mesh independence facendo variare, separatamente, due diversi parametri:

- Base size della cella
- Numero di inflation layer sulla parete del cilindro

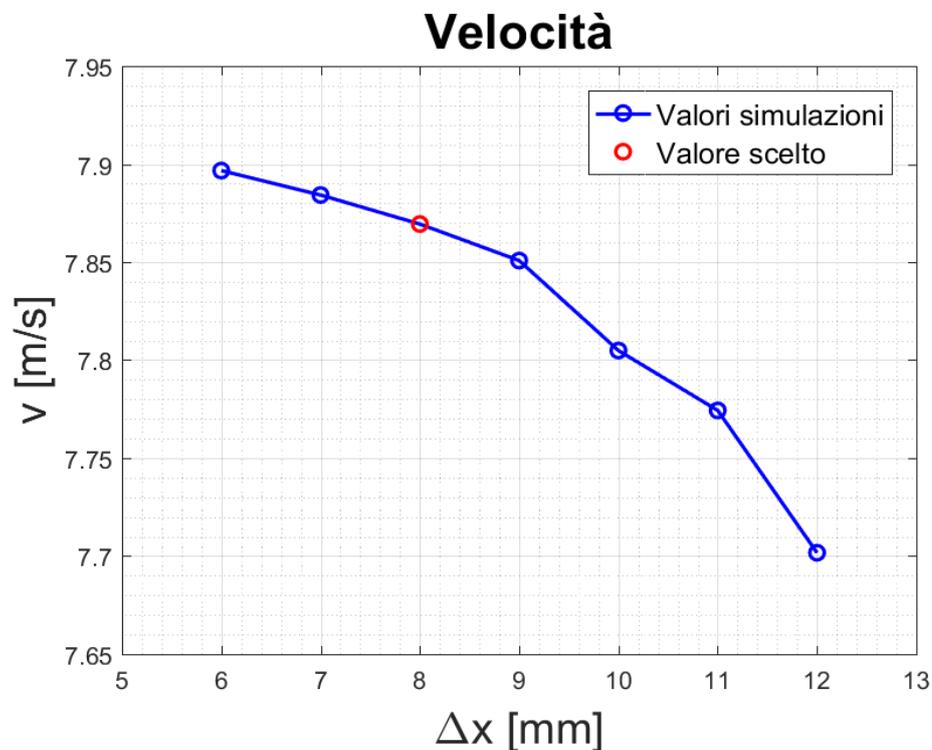
Si è poi ritenuto ragionevole far variare la dimensione degli elementi degli infittimenti in base alla variazione percentuale del base size generale, in modo da mantenere una coerenza nel rapporto di crescita tra le varie celle.

Le grandezze fisiche utilizzate per monitorare lo studio sono state:

- Velocità del flusso
- Frazione massica di CH_4

ritenute le grandezze fisiche maggiormente caratteristiche e monitorate a valle dell'ostacolo.

Possiamo ora vedere i risultati dello studio al variare del base size:



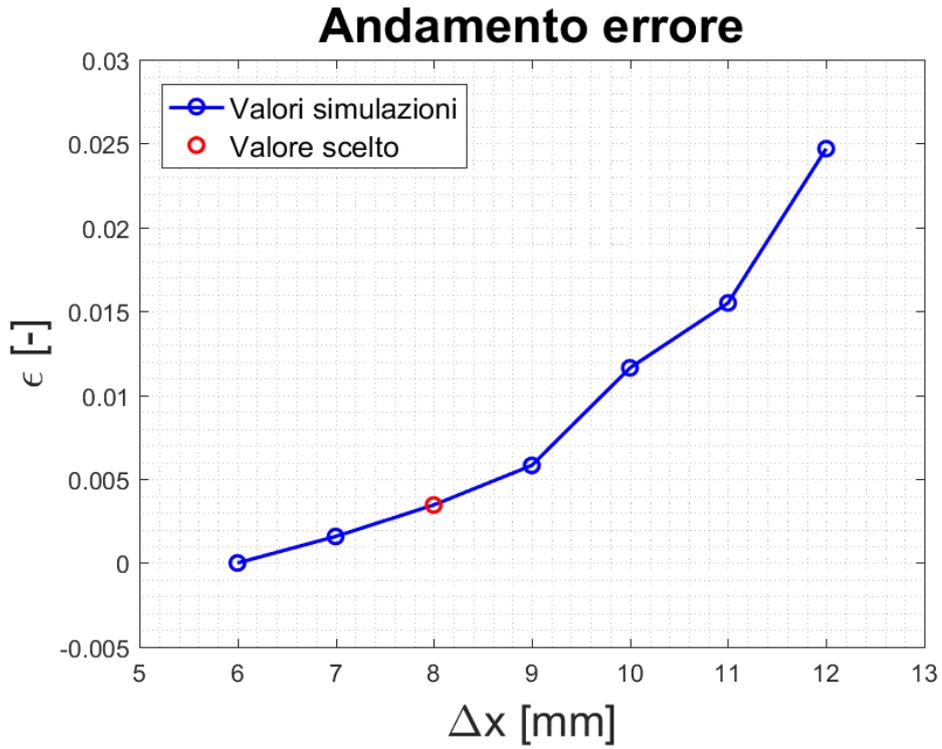
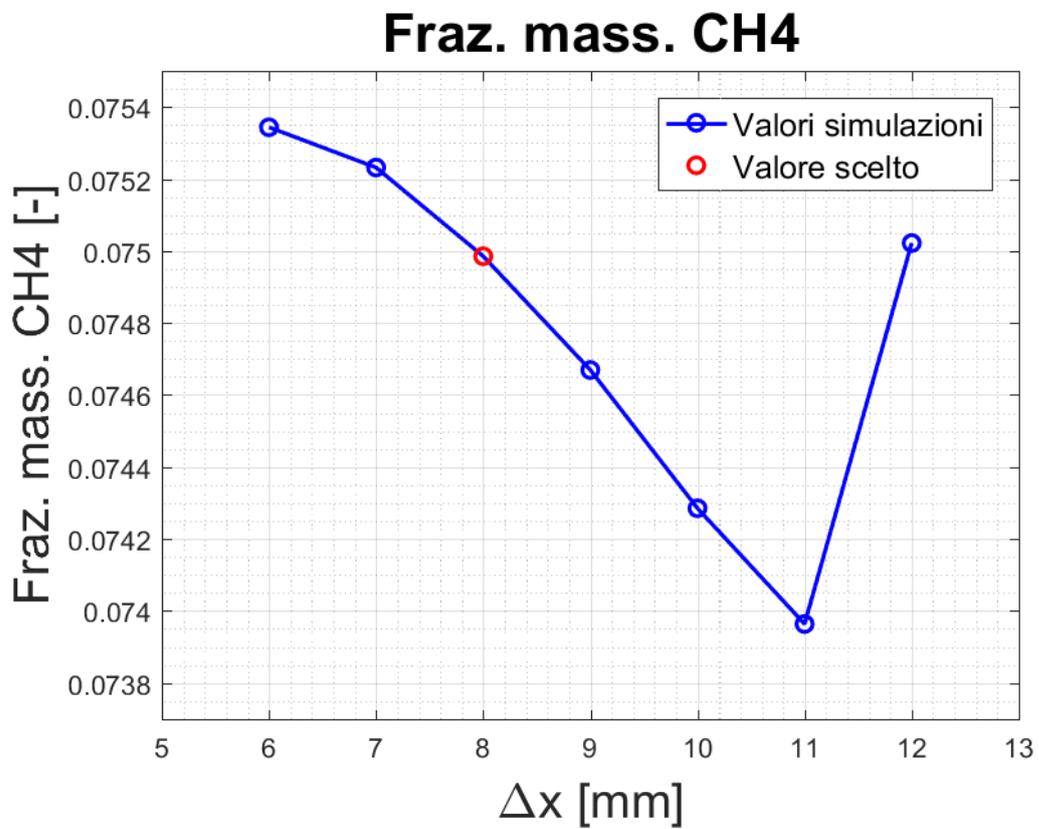


Figura 3.16: Andamento della velocità al variare del base size e andamento dell'errore relativo



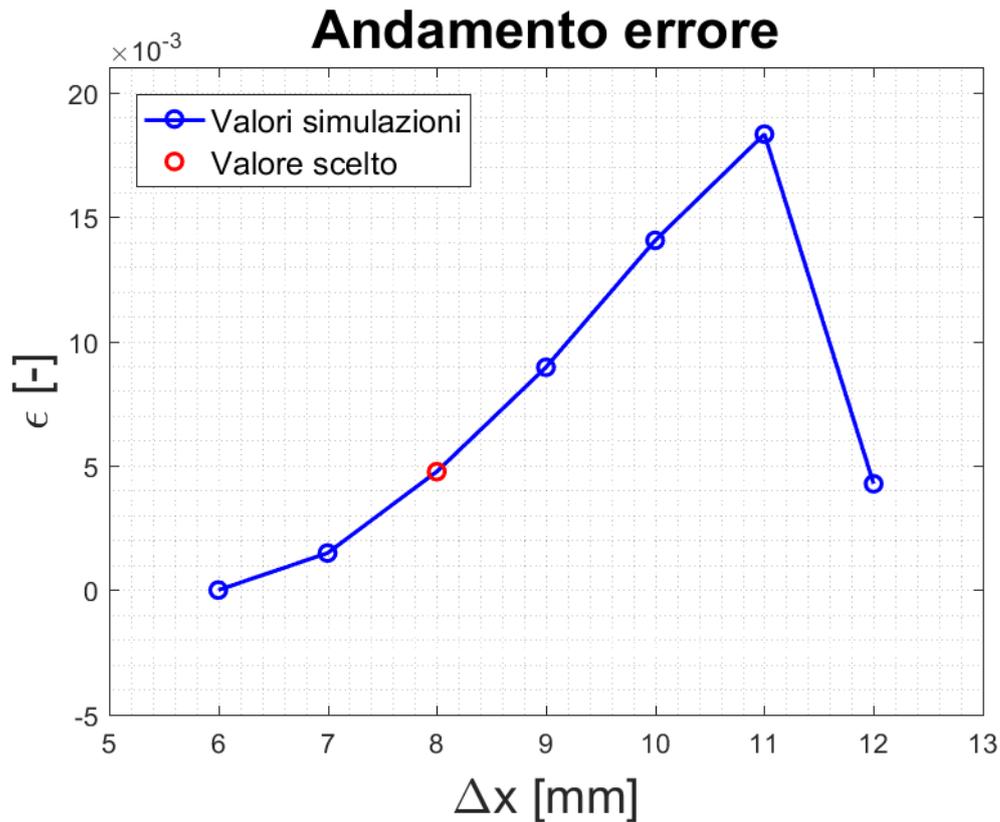


Figura 3.17: Andamento della frazione massica al variare del base size e andamento dell'errore relativo

Dai grafici 3.16 e 3.17 è possibile vedere come le curve delle grandezze monitorate al variare del base size tendano ad appiattirsi mostrando la tendenza ad un valore costante, permettendo così alla soluzione di essere numericamente indipendente. Lo stesso vale per l'errore che presenta un andamento sempre meno accentuato. Si è dunque deciso di assumere un valore di base size pari a 8 mm per le simulazioni da svolgere, in modo da scegliere un compromesso accettabile tra errore relativo della soluzione e costo computazionale.

È possibile vedere risultati analoghi al variare del numero di layer:

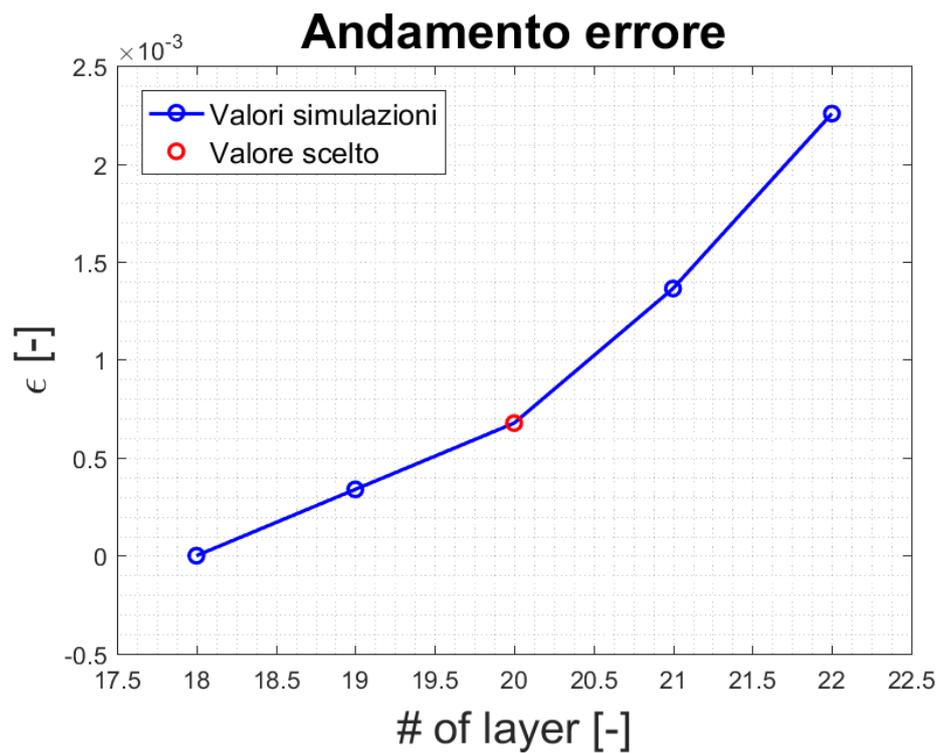
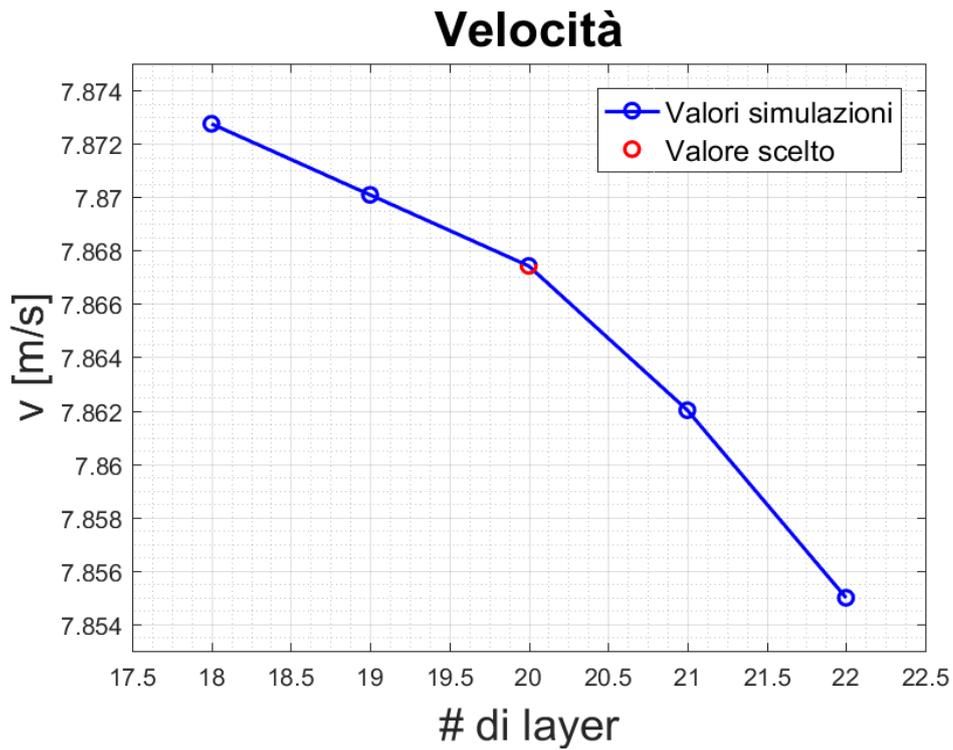


Figura 3.18: Andamento della velocità al variare del numero di layer e andamento dell'errore relativo

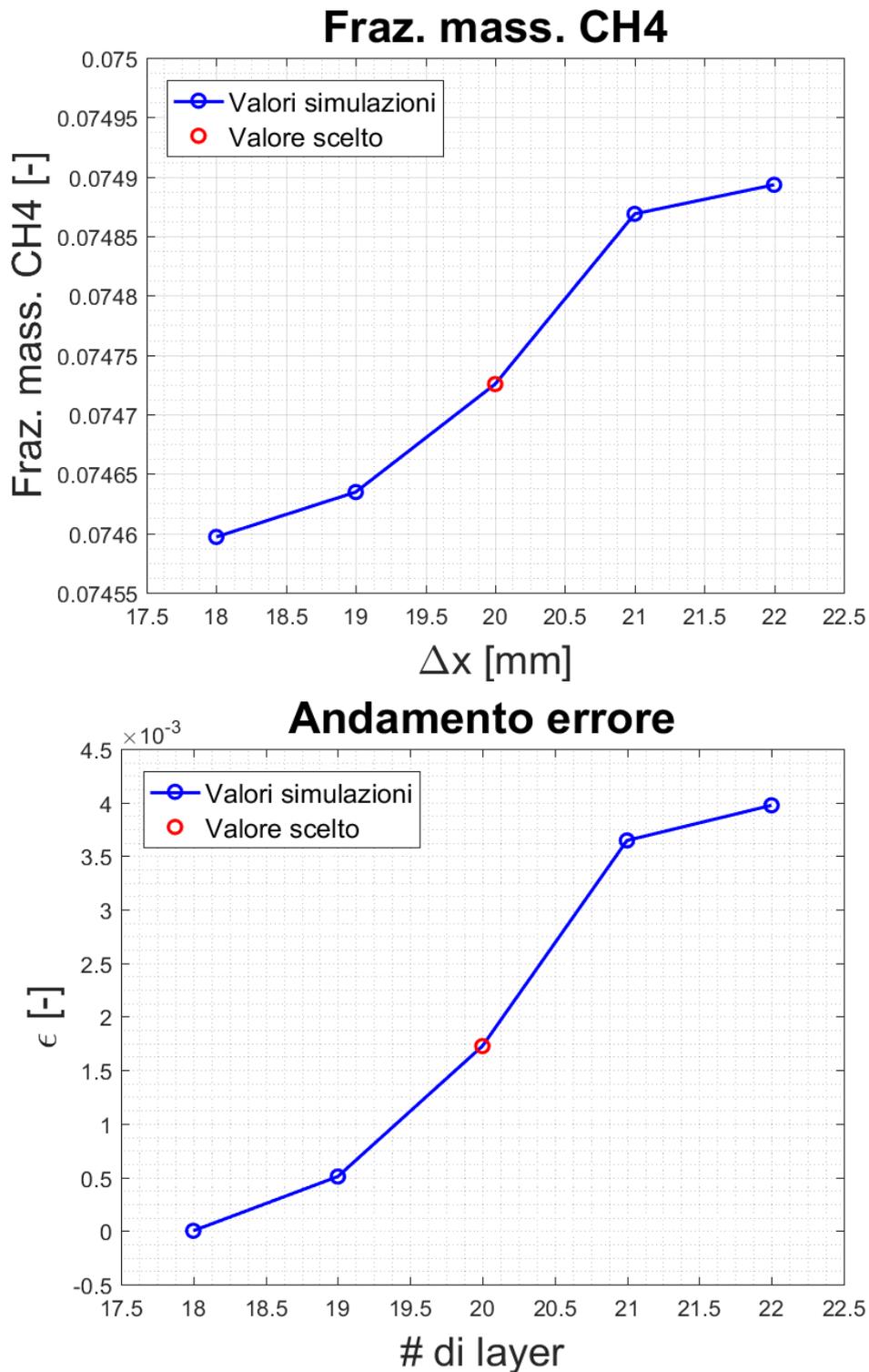


Figura 3.19: Andamento della frazione massica al variare del numero di layer e andamento dell'errore relativo

È possibile osservare dai grafici 3.18 e 3.19 un fenomeno analogo a quelli precedenti in cui si è fatto variare il base size. Infatti, variando il numero di layer la simulazione tende a dei valori costanti, quindi la soluzione è indipendente numericamente e lo strato limite è risolto in maniera adeguata. Si è dunque deciso di assumere un valore di layer pari a 8 mm.

A questo punto si è deciso di utilizzare una simulazione con i seguenti parametri:

- Base size: 8 mm
- Numero di layer: 20

Si è così ottenuta una griglia di calcolo di 26613 celle.

3.5 Simulazione 3D

Una volta svolto il lavoro in geometria 2D sarà necessario svolgere il medesimo lavoro in 3D in modo da verificare che i fenomeni riscontrati precedentemente si verifichino in un dominio più realistico.

3.5.1 Geometria

Nel caso 3D è stato possibile sfruttare sia il piano di simmetria XZ, che il piano XY, in modo da simulare solamente un quarto di dominio e ridurre notevolmente il costo computazionale della simulazione.

Come si può vedere:

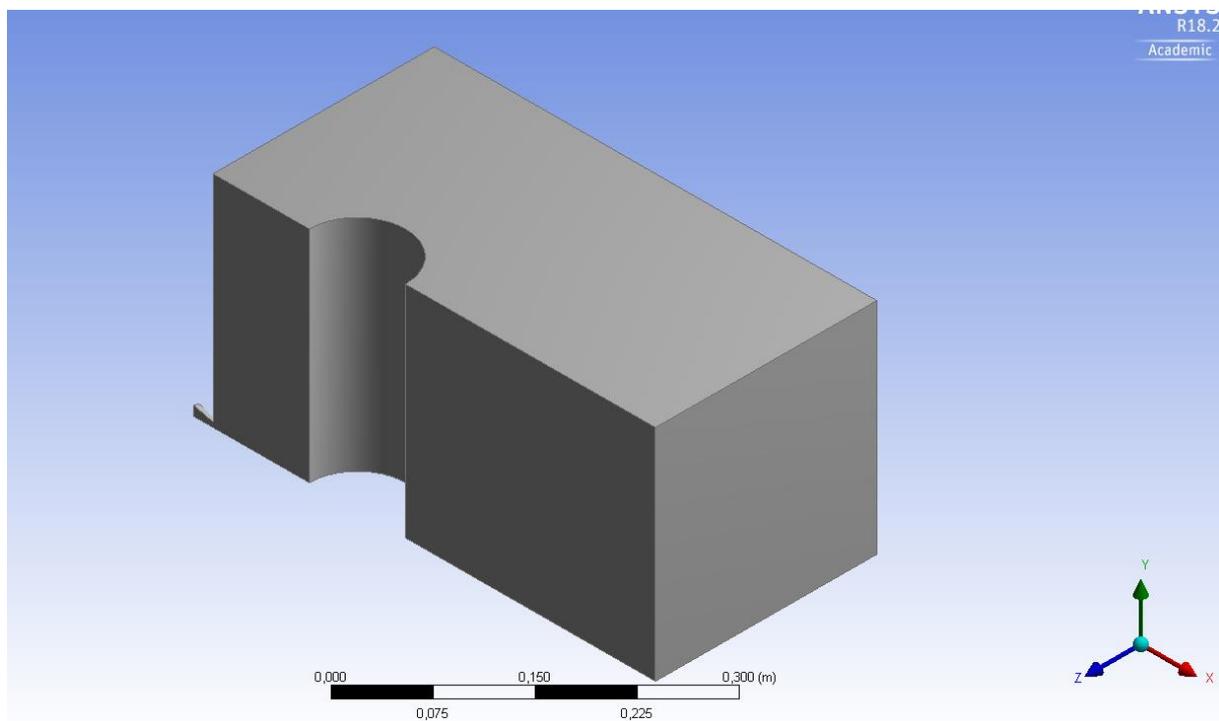


Figura 3.20: Dominio nel caso tridimensionale

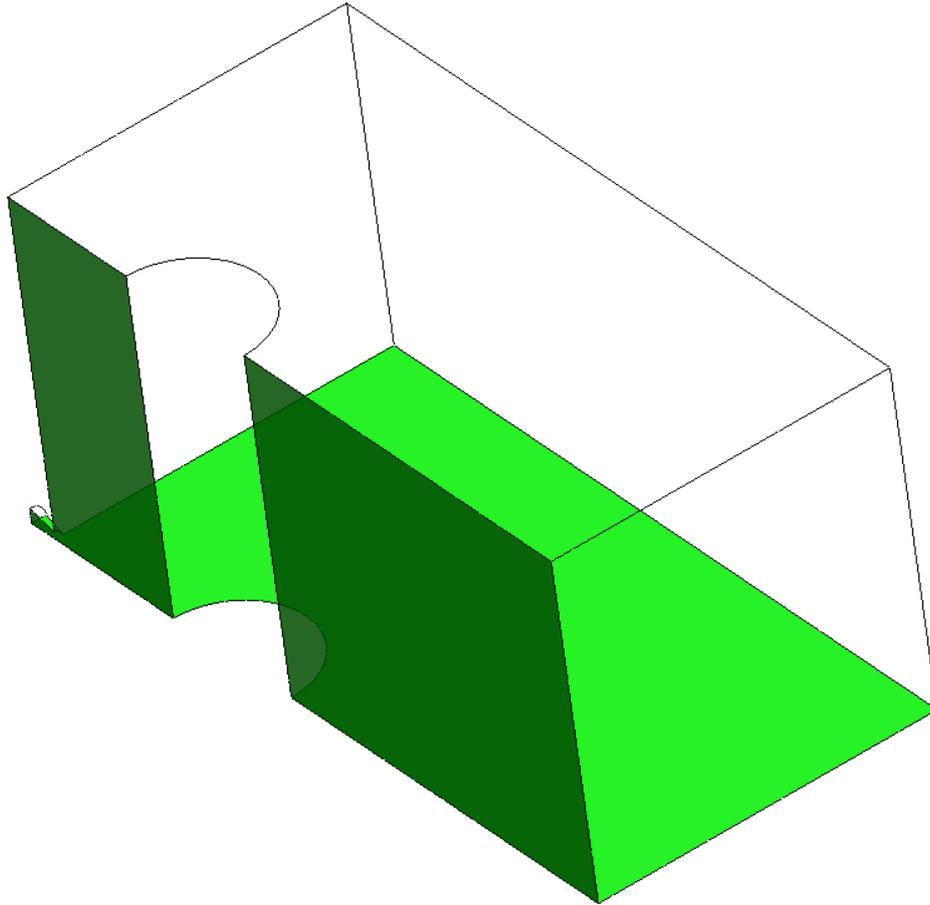


Figura 3.21: Piani di simmetria del problema

La Source Box è stata dimensionata in maniera analoga al caso precedente, ovvero per $P = 50 \text{ bar}$ e $d_{\text{foro}} = 1 \text{ cm}$, con una lunghezza caratteristica $L_{SB} \approx 0.46 \text{ m}$.

Per realizzare la geometria è stato sempre usato Design Modeler Tool, strumento interno ad ANSYS.

3.5.2 Mesh o griglia di calcolo

La griglia di calcolo è stata realizzata tramite ANSYS Meshing, in questa occasione è stata utilizzata una mesh non strutturata tetraedrica. Il primo motivo di questa scelta è un limite operativo, in quanto in una geometria 3D è l'unica tipologia di mesh che ANSYS Meshing permette di combinare con l'uso degli inflation layer. Il secondo motivo è di natura pratica, in quanto una mesh tetraedrica permette di diminuire i tempi di calcolo. Anche in questo caso sono stati realizzati degli infittimenti nelle zone ritenute critiche.

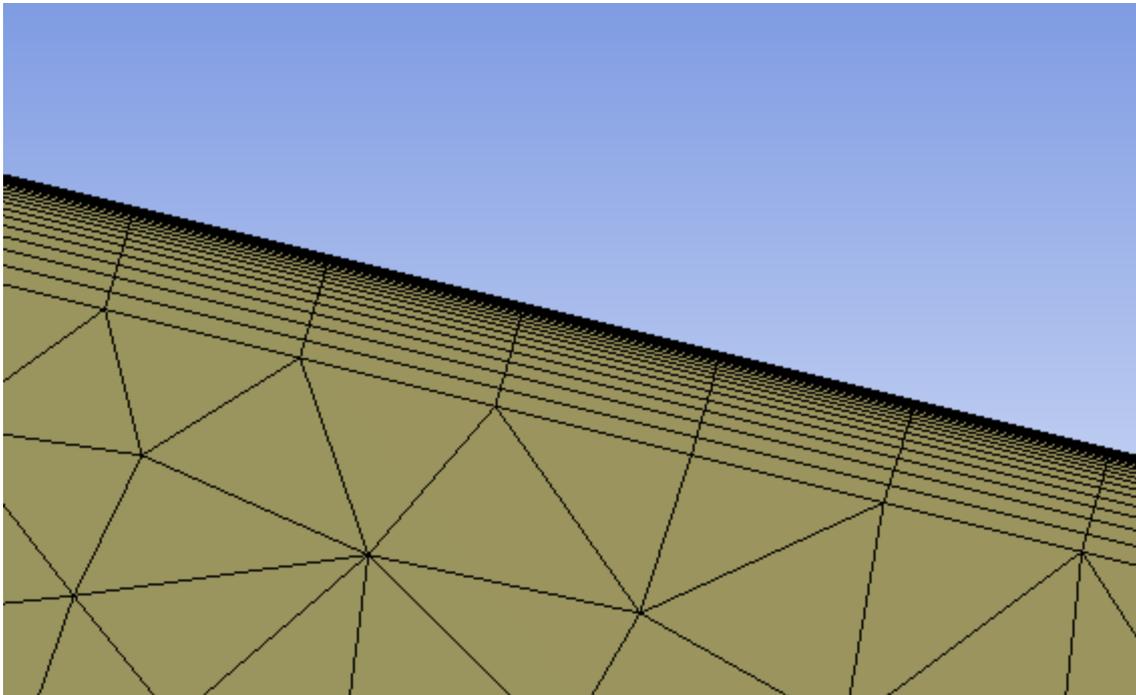
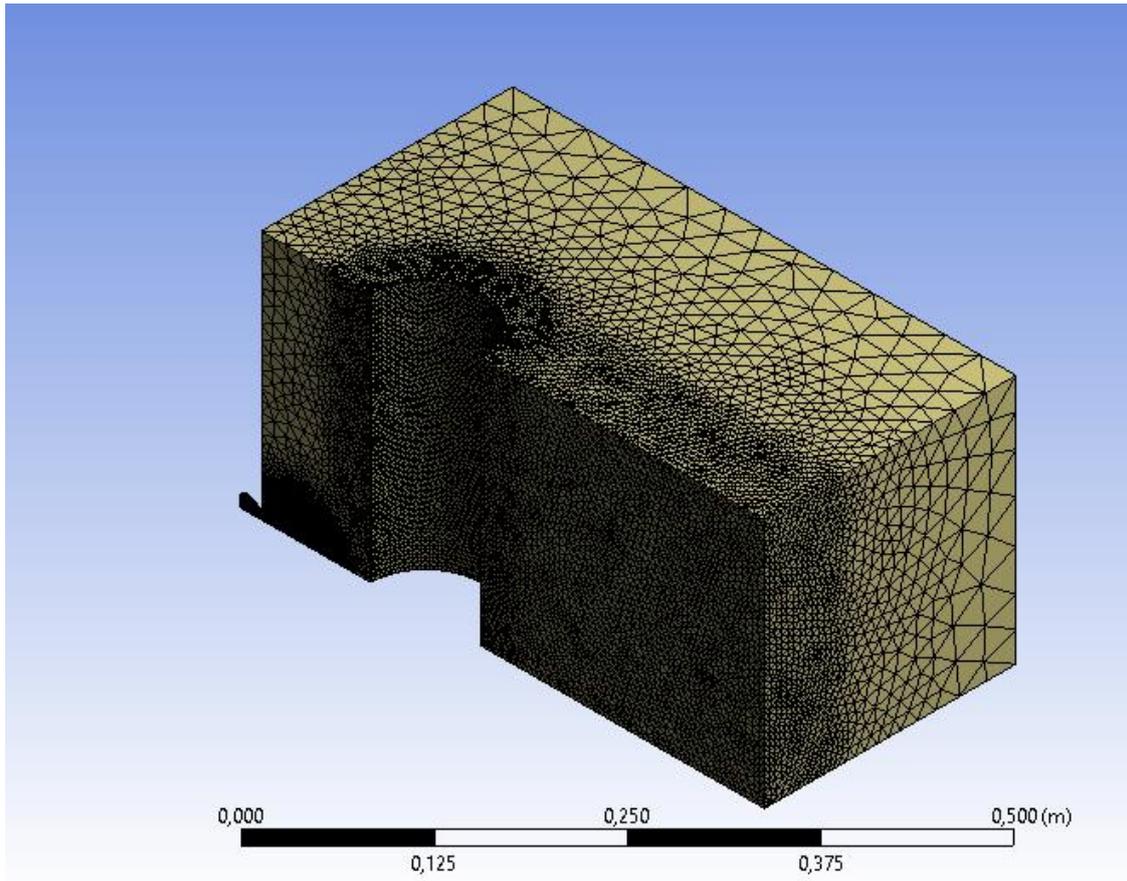


Figura 3.22: Mesh utilizzata e dettagli della zona di strato limite

3.5.3 Setup di Fluent

Le assunzioni fisiche fatte per il setup del solver fluidodinamiche sono analoghe al caso bidimensionale.

È necessario invece ricapitolare le condizioni al contorno imposte:

Tabella 3: Elenco delle condizioni al contorno imposte

Regione fisica	Boundary condition
Parete ugello	Wall
Parete cilindro	Wall
Ingresso ugello	Pressure inlet
Piano XZ	Symmetry
Piano XY	Symmetry
Parete frontale al foro	Pressure outlet
Parete nell'asse del foro	Pressure outlet
Parete laterale	Pressure outlet
Parete superiore	Pressure outlet

Successivamente è stato settato lo schema numerico di risoluzione in maniera analoga al caso antecedente.

In seguito la simulazione è stata inizializzata e avviata, procedendo con il seguente criterio:

- ~ 1000 iterazioni tramite schema upwind di primo ordine
- ~ 6000 iterazioni tramite schema upwind di secondo ordine

in modo da garantire una più stabile e veloce risoluzione.

Una volta conclusa la simulazione si è verificata la convergenza numerica della soluzione tramite:

- Visualizzazione dei residui
- Monitor della velocità del flusso sulla faccia frontale al foro
- Monitor della velocità del flusso sulla faccia superiore del dominio
- Monitor della frazione massica di CH₄ sulla faccia frontale al foro
- Monitor della frazione massica di CH₄ sulla faccia superiore del dominio

e come è possibile appurare nelle Fig.3.23-3.27 la simulazione è giunta a convergenza.

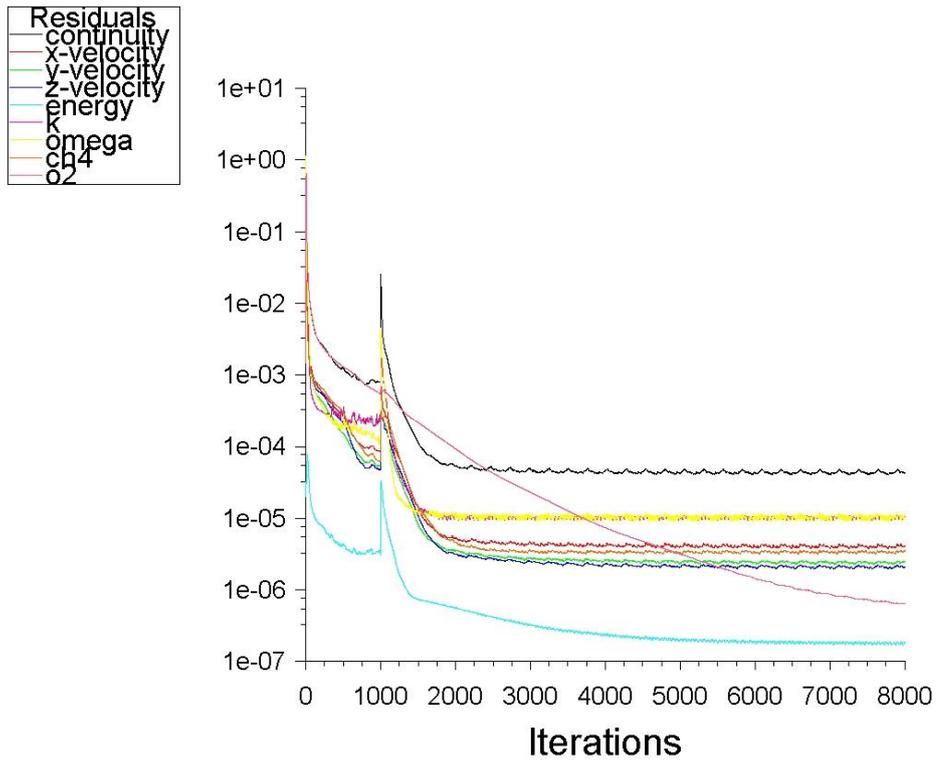


Figura 3.23: Andamento dei residui nella simulazione 3D

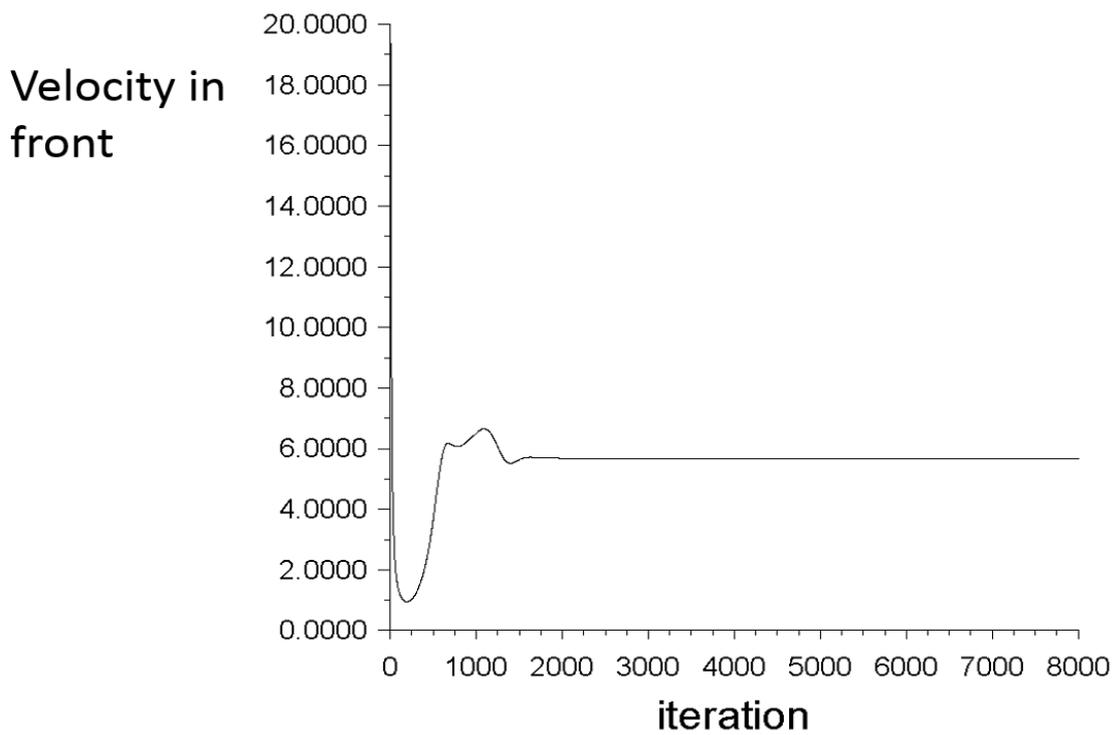


Figura 3.24: Monitor della velocità di flusso sulla faccia frontale al foro

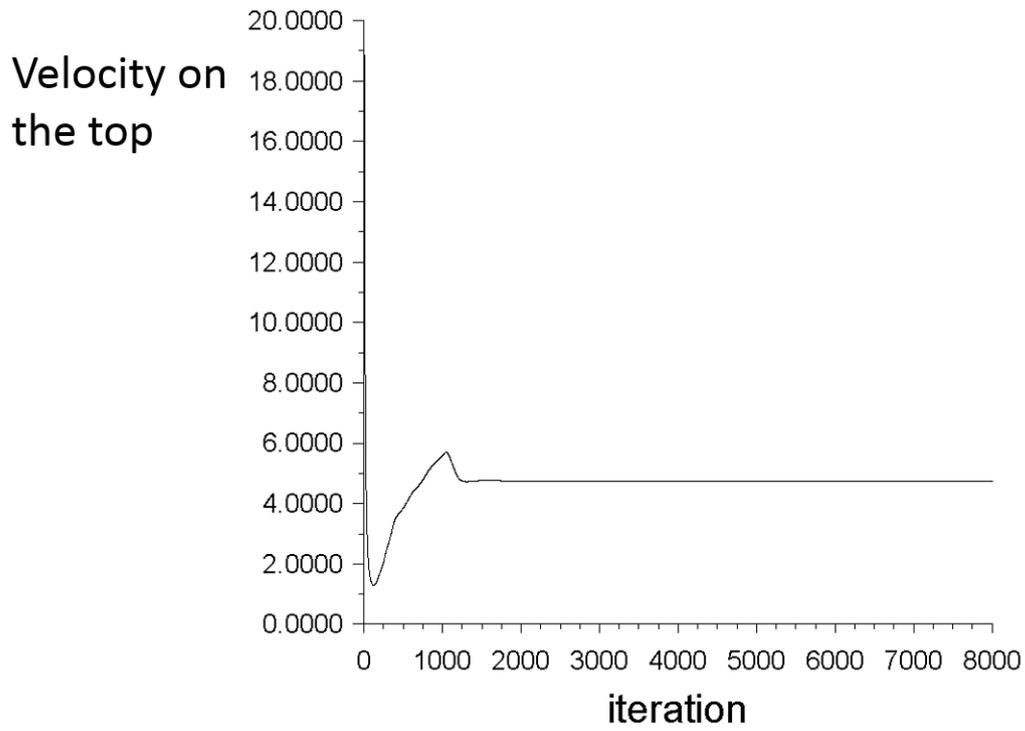


Figura 3.25: Monitor della velocità del flusso sulla faccia superiore del dominio

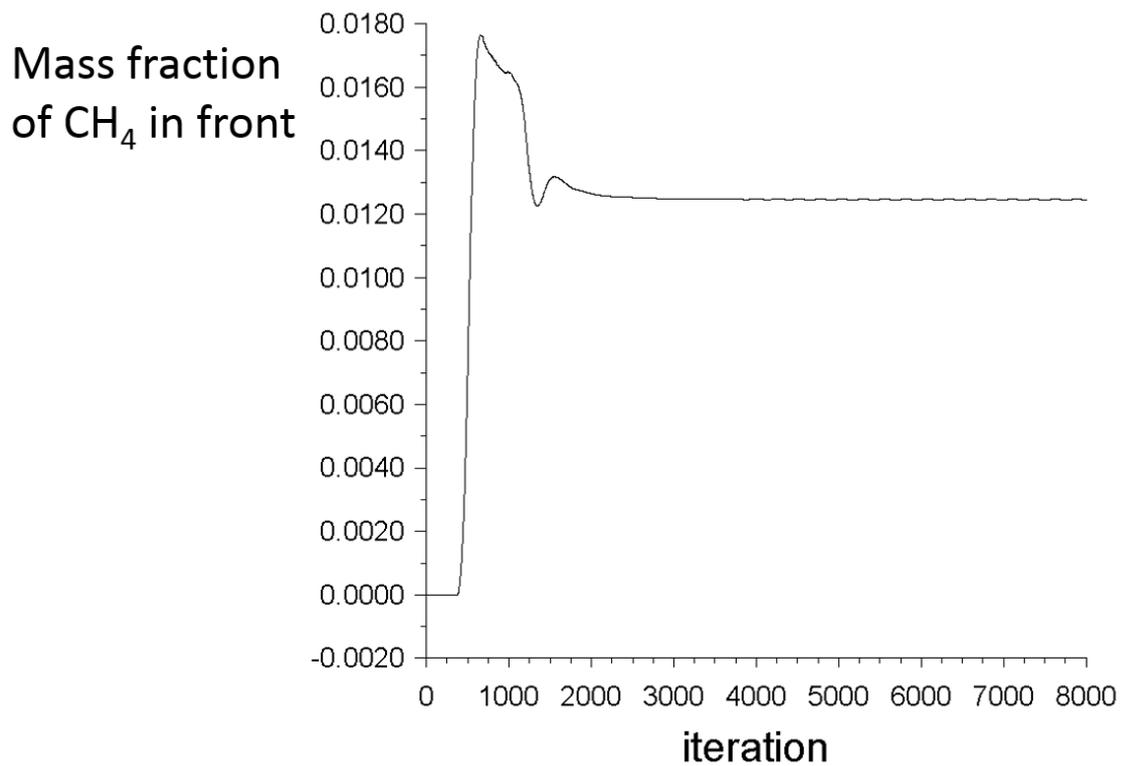


Figura 3.26: Monitor della frazione massica di CH₄ sulla faccia frontale al foro

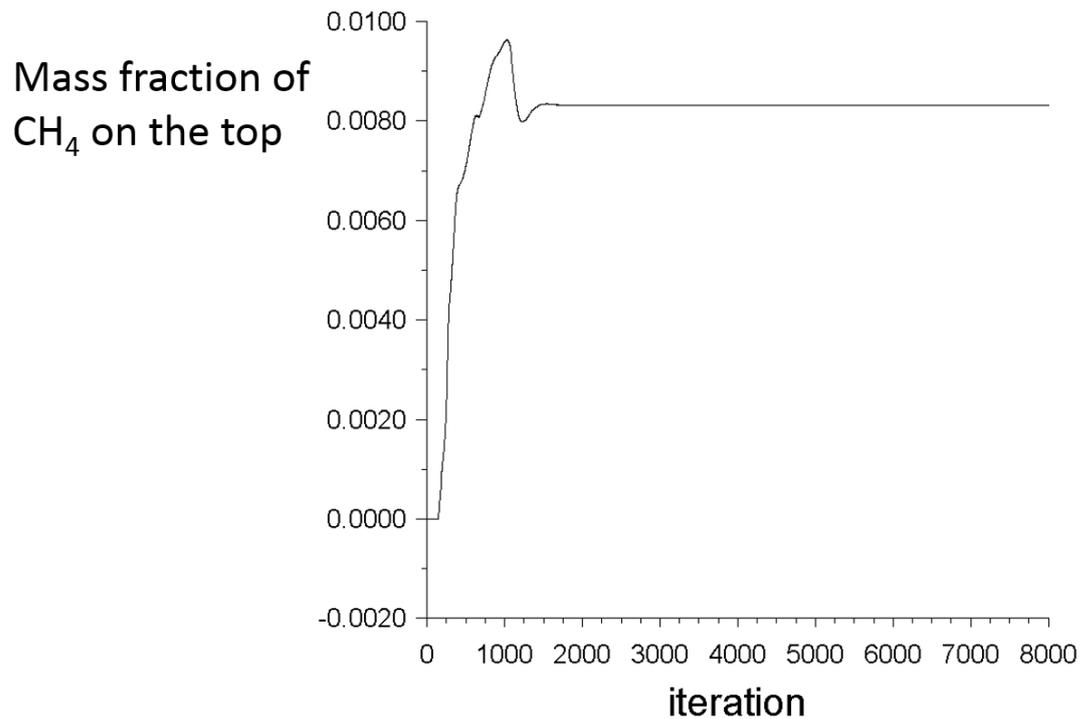


Figura 3.27: Monitor della frazione massica di CH₄ sulla parete superiore del dominio

3.4.5 Studio di grid independence in geometria 3D

Anche in questo caso è stata svolta un'analisi di grid independence per verificare la bontà della soluzione ottenuta

È stato fatto variare il valore di base size della cella. Come nell'analisi precedente il base size degli infittimenti è stato fatto variare in percentuale alla variazione del base size generale.

Le grandezze fisiche a valle dell'ostacolo per eseguire lo studio sono state:

- Velocità del flusso
- Frazione massica di CH₄

Possiamo ora vedere i risultati dello studio al variare del base size:

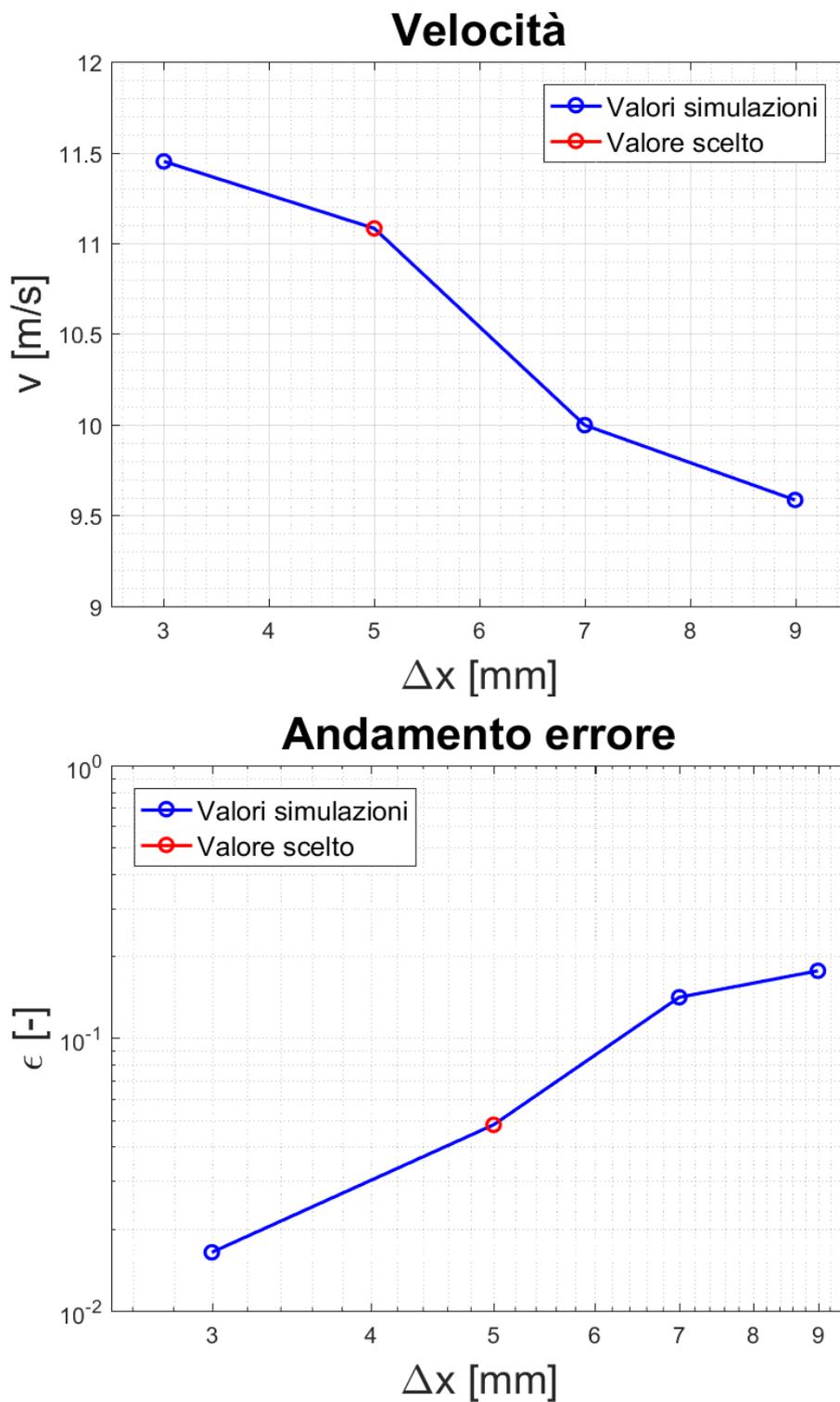


Figura 3.28: Andamento della velocità al variare del base size e andamento dell'errore relativo

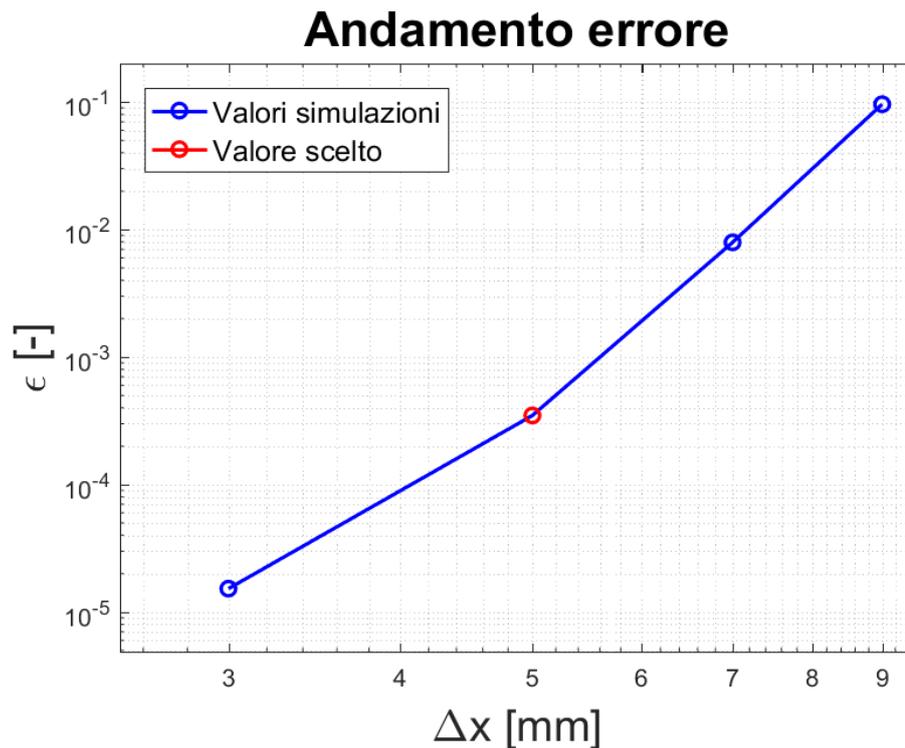
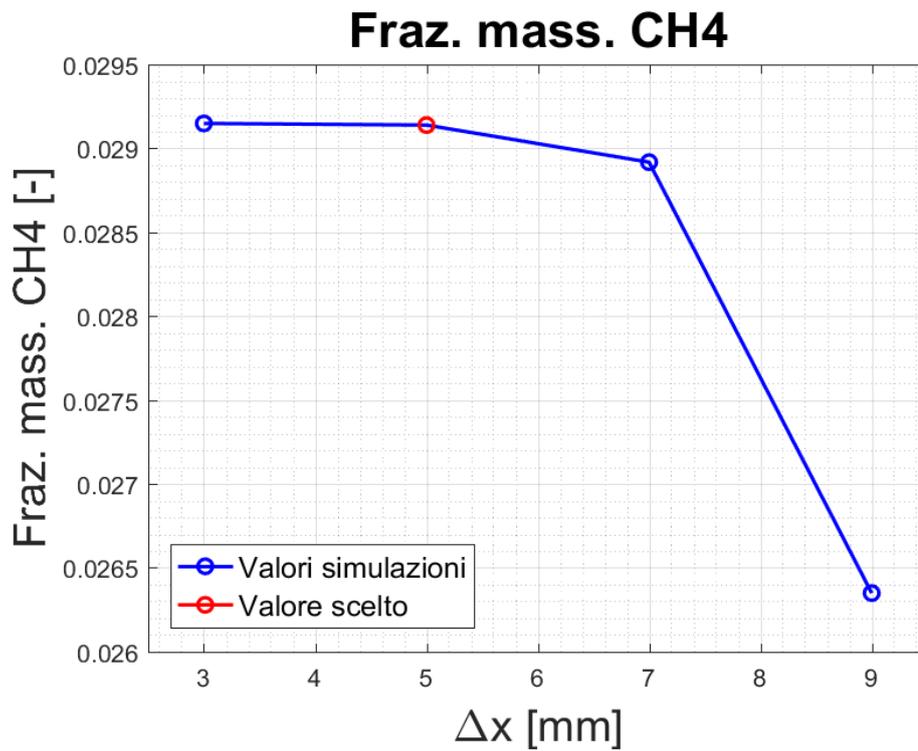


Figura 3.29: Andamento della frazione massica al variare del base size e andamento dell'errore relativo

Dai grafici 3.28 e 3.29 possiamo vedere come la soluzione va a convergenza numerica e ha un errore accettabile.

Nel caso tridimensionale si è dunque deciso di utilizzare una simulazione con i seguenti parametri:

- Base size: 5 mm

- Numero di layer: 20

Si è così ottenuta una griglia di calcolo di ~ 950000 celle.

4. Risultati

In questo quarto capitolo verranno esposti tutti i risultati ottenuti durante lo studio di sensitività sui parametri che influenzano il fenomeno nella fase di rilascio.

Si è dunque deciso di verificare la consistenza fisica della soluzione per vedere se le simulazioni impostate ricreano il fenomeno voluto. Successivamente si è deciso di indagare i parametri caratteristici della Source Box. Lo studio è iniziale con un'analisi di sensitività dei parametri geometrici, in modo da comprendere come questi possano influenzare il fenomeno all'interno della Source Box e cercare di poter predire il comportamento del flusso al loro variare, in modo da diminuire il numero di Source Box da studiare. Infine, la stessa analisi è stata compiuta considerando l'input fisico principale, ovvero la pressione di rilascio del gas, di cui si è analizzato al variare di essa come cambia il fenomeno di rilascio.

4.1 Consistenza fisica della soluzione

Nel seguente paragrafo verrà discussa la consistenza fisica della soluzione sia nel caso bidimensionale che in quello tridimensionale, in modo da verificare se la simulazione rispetta le previsioni teoriche

4.1.1 Caso in due dimensioni

Al fine della risoluzione numerica della simulazione si è utilizzato l'ambiente "Post-Processing" di ANSYS per verificare i risultati ottenuti. Si è deciso di analizzare lo sviluppo del campo di velocità del fluido e della presenza di frazione massica di CH_4 all'interno del dominio.

Il campo di velocità si presenta come in Fig.4.1:

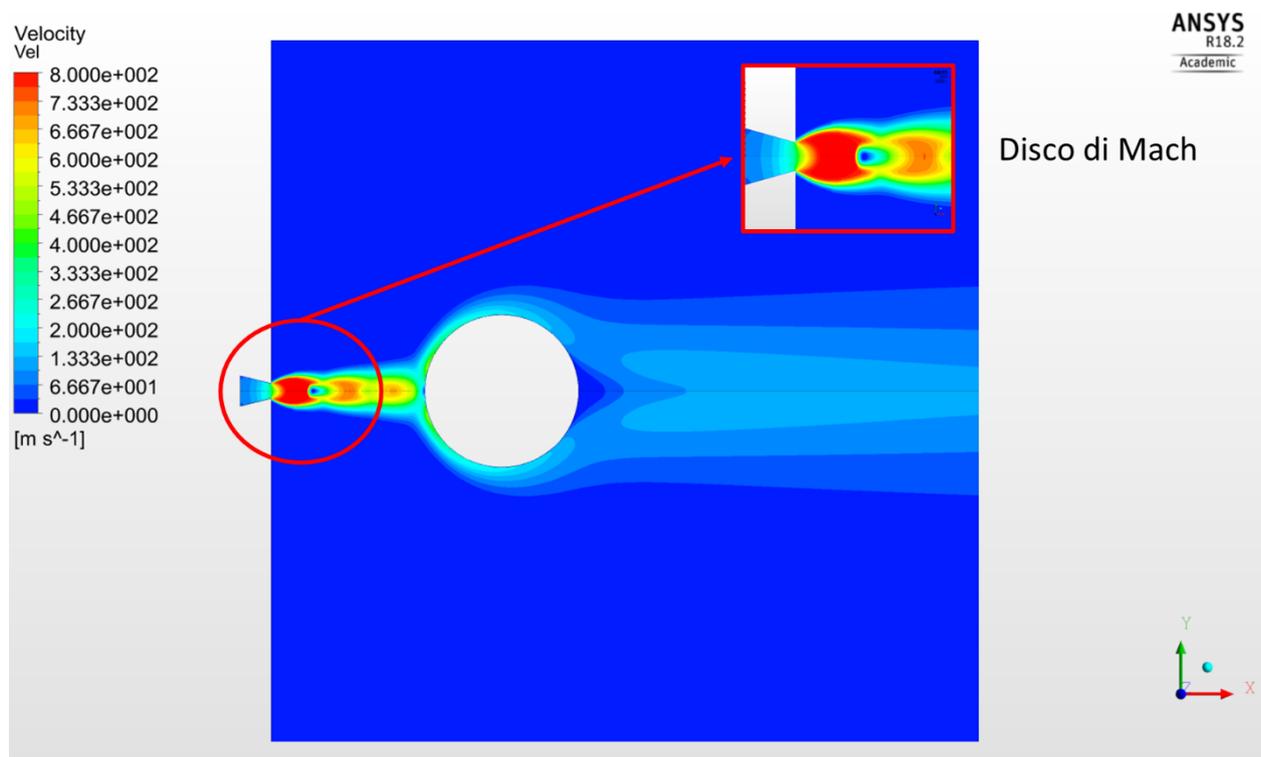


Figura 4.1: Campo di velocità per $P = 10$ bar

I risultati rispettano le aspettative fisiche, è possibile osservare l'esistenza del disco di Mach, situato subito dopo lo sbocco del condotto convergente, dovuto alla sottoespansione del getto. A valle del disco di Mach sono presenti due diverse zone, una centrale subsonica e una anulare supersonica, che caratterizzano il getto sino all'impatto con l'ostacolo. È inoltre possibile apprezzare la presenza dell'effetto Coanda, con il fluido che si richiude a valle dell'ostacolo, e la presenza di distacco di vena fluida sulla parete posteriore del cilindro. La velocità di sbocco dell'ugello è quella predetta dalla teoria tramite l'Eq. 2.37 che indica un valore ~ 350 m/s. La frazione massica di CH_4 si presenta come in Fig.4.2.

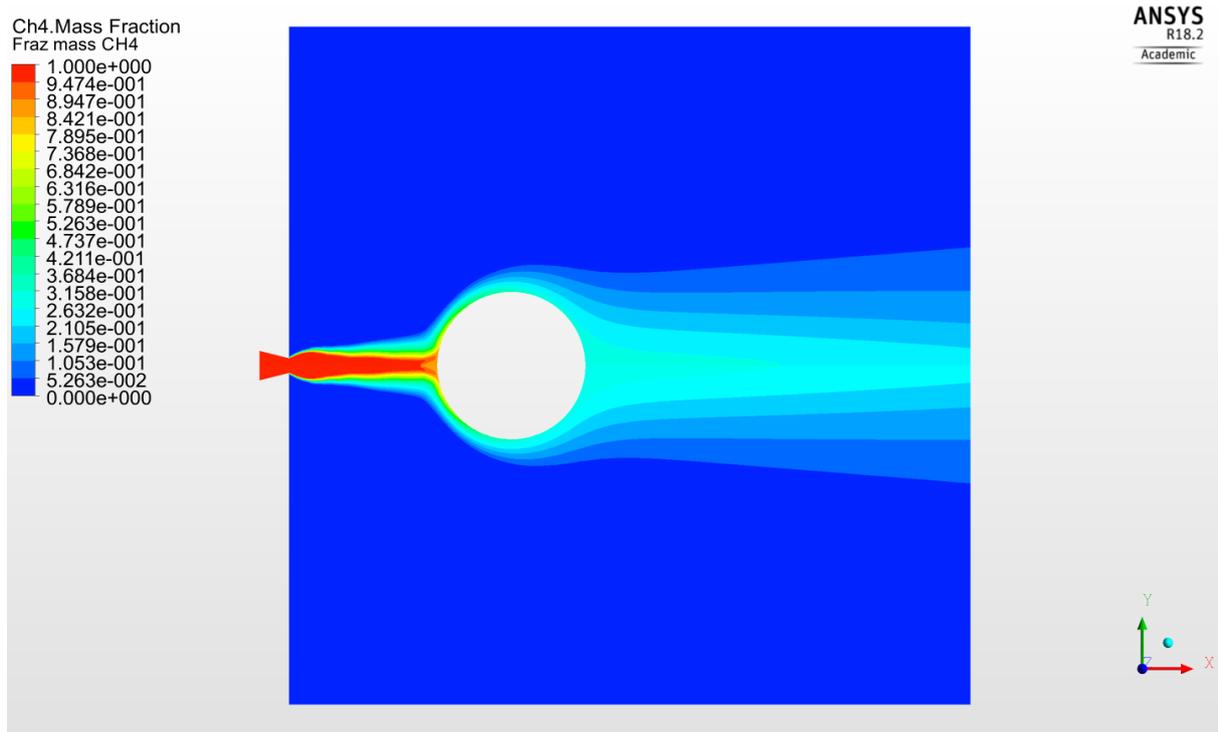


Figura 4.2: Distribuzione spaziale della frazione massica a $P = 10$ bar

Si può dunque vedere come la frazione massica di CH_4 sia pressoché unitaria vicino allo sbocco e decresca all'aumentare della distanza dalla sorgente di metano. Si può vedere come grazie alle alte velocità il getto sia fortemente direzionato e il metano si concentra esclusivamente sulla faccia frontale alla sorgente di rilascio.

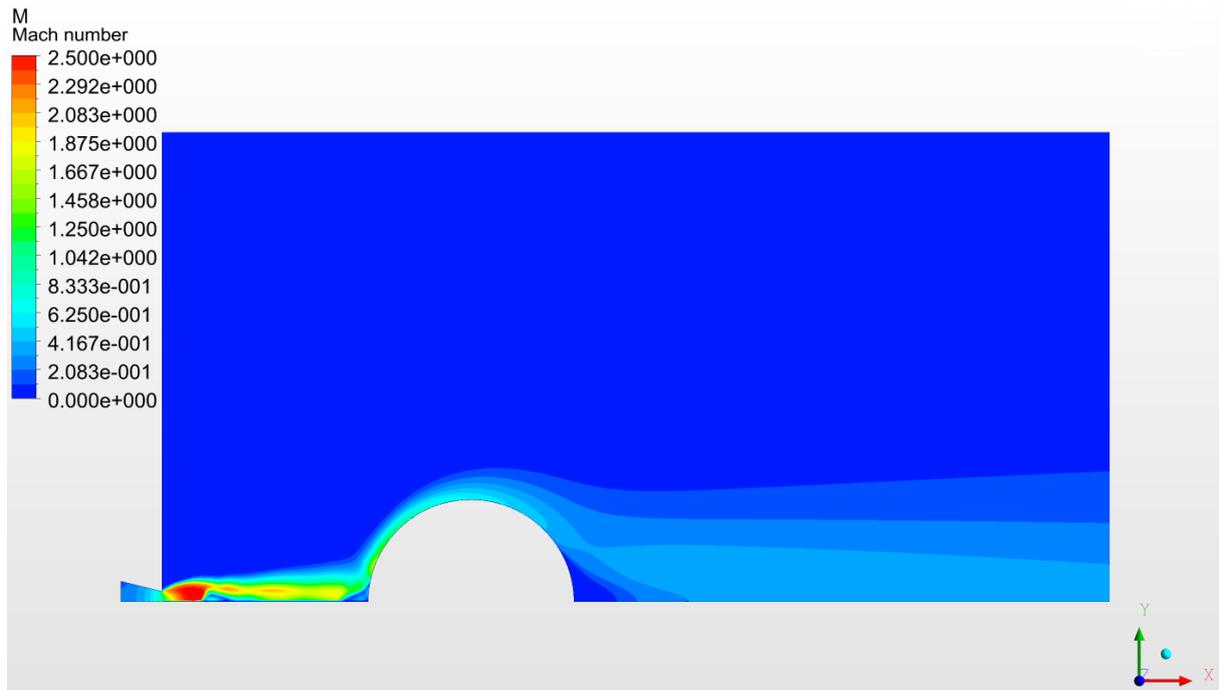


Figura 4.3: Numero di Mach per P = 10 bar

Grazie alla Fig.4.3, che rappresenta il numero di Mach, possiamo vedere come i fenomeni di comprimibilità vengono esauriti all'interno del dominio. In questo modo è possibile giustificare l'utilizzo della Source Box e giustificare l'assunzione di fluido incomprimibile nella fase di dispersione.

4.1.2 Caso in tre dimensioni

Anche in questo caso sono stati analizzati il campo di velocità e la frazione massica di metano della simulazione.

Il campo di velocità si presenta come in Fig.4.4:

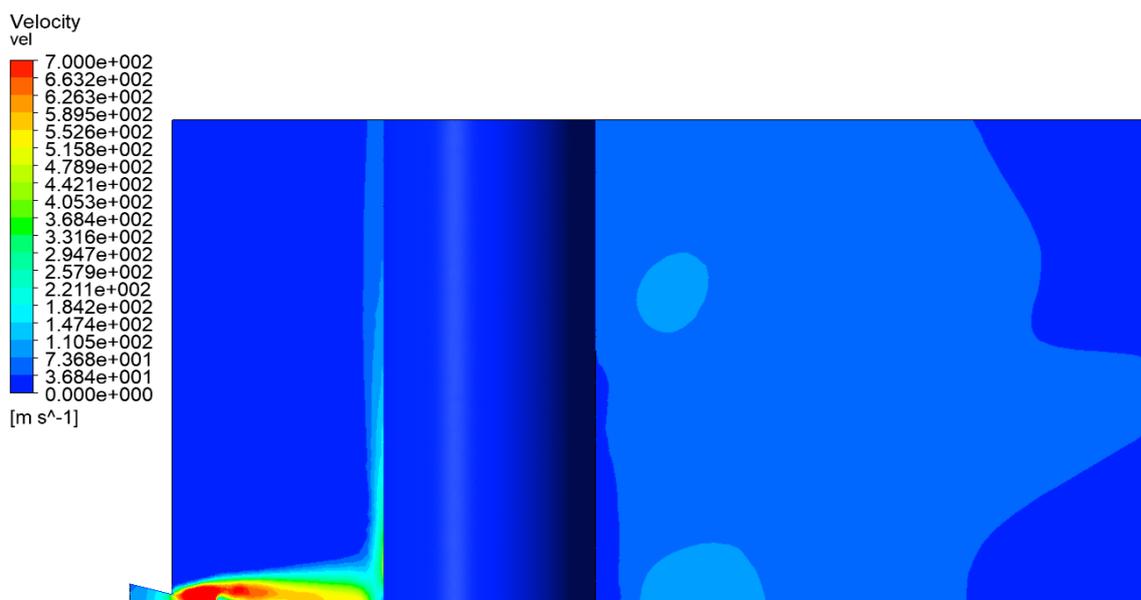


Figura 4.4: Campo di velocità in 3D per P = 10 bar

Anche in questo caso si può apprezzare la struttura caratteristica del getto. Rispetto al caso 2D è importante notare come il flusso si sviluppi anche lungo l'altezza del cilindro.

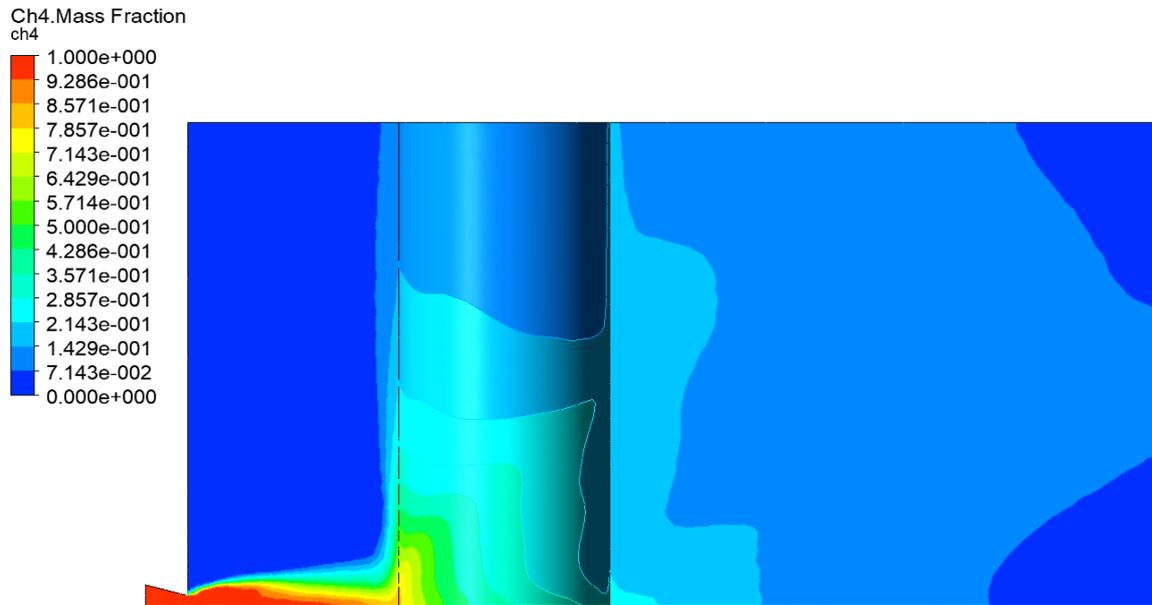


Figura 4.5: Distribuzione spaziale della frazione massica di metano in 3D

I fenomeni descritti per il campo di velocità vengono confermati anche dall'analisi della frazione massica di metano nel dominio. Inoltre, bisogna sottolineare come è rilevante la percentuale di metano presente nella faccia superiore del dominio, che risulterà di conseguenza importante nella fase di studio della dispersione di inquinanti.

4.2 Studio dei 3 fattori

Come preannunciato nel paragrafo 3.3 il lavoro è iniziato con la ricerca di una relazione tra i parametri geometrici che caratterizzano la Source Box.

Questo studio ha cercato di mantenere una similitudine geometrica. Ovvero si è deciso di far variare il diametro del cilindro mantenendo i seguenti rapporti con le altre grandezze:

- $\frac{d_{foro}}{d_{cyl}} = 0.1$
- $\frac{l}{d_{cyl}} = 1.5$

Allora fissata la pressione a $P_{stoc} = 10 \text{ bar}$ i casi analizzati sono stati i seguenti:

Tabella 4.1: Casi analizzati nello studio dei 3 fattori

$d_{foro} [m]$	$L_{SB} [m]$	$d_{cyl} [m]$	$l [m]$
0.01	0.46	0.1	0.15
0.015	0.68	0.15	0.225
0.02	0.91	0.2	0.3
0.025	1.14	0.25	0.375
0.03	1.37	0.3	0.45
0.035	1.60	0.35	0.525

Si è deciso di studiare casi in cui la Source Box non avesse una lunghezza caratteristica maggiore di 1.60 metri, in modo da poter essere considerata come una sorgente puntiforme nella fase di dispersione.

Sono stati monitorati l'andamento della velocità del flusso e la sua frazione massica di metano sulla faccia frontale al foro. Come possiamo osservare dai grafici 4.6 e 4.7, nonostante in tutte le simulazione sia stato modellato il fenomeno predetto teoricamente, non si è ricavato un trend che potesse essere utile ad identificare una relazione tra questi parametri. In seguito a questo si è deciso di proseguire con un diverso studio.

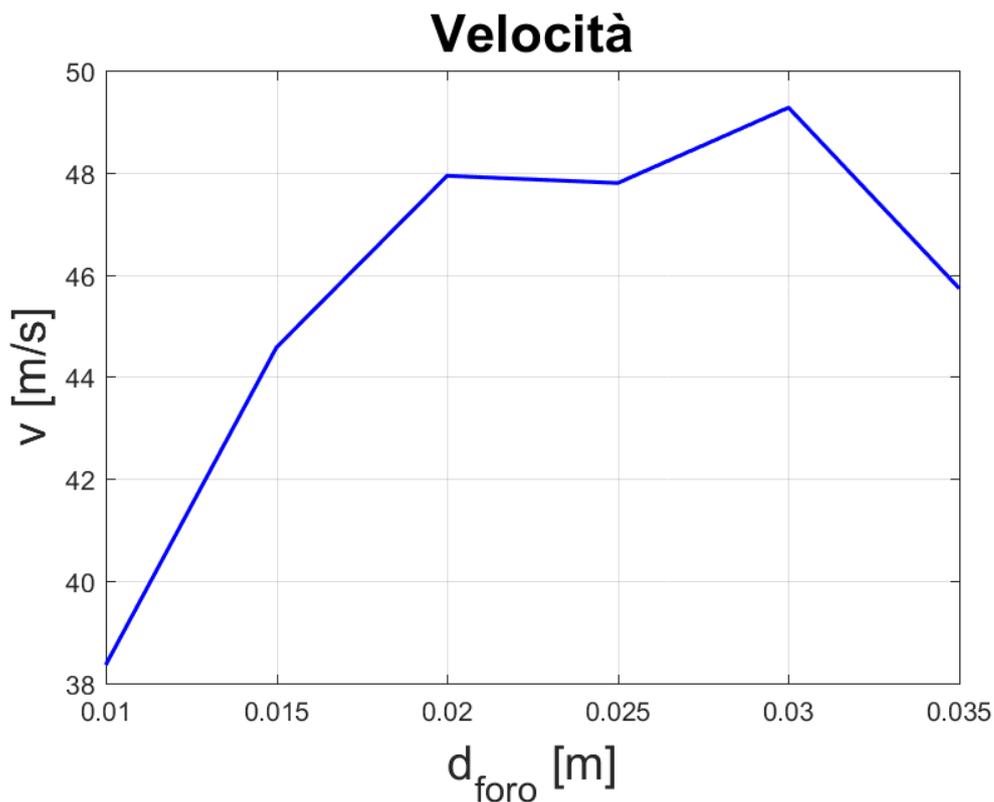


Figura 4.6: Andamento della velocità sulla faccia di uscita

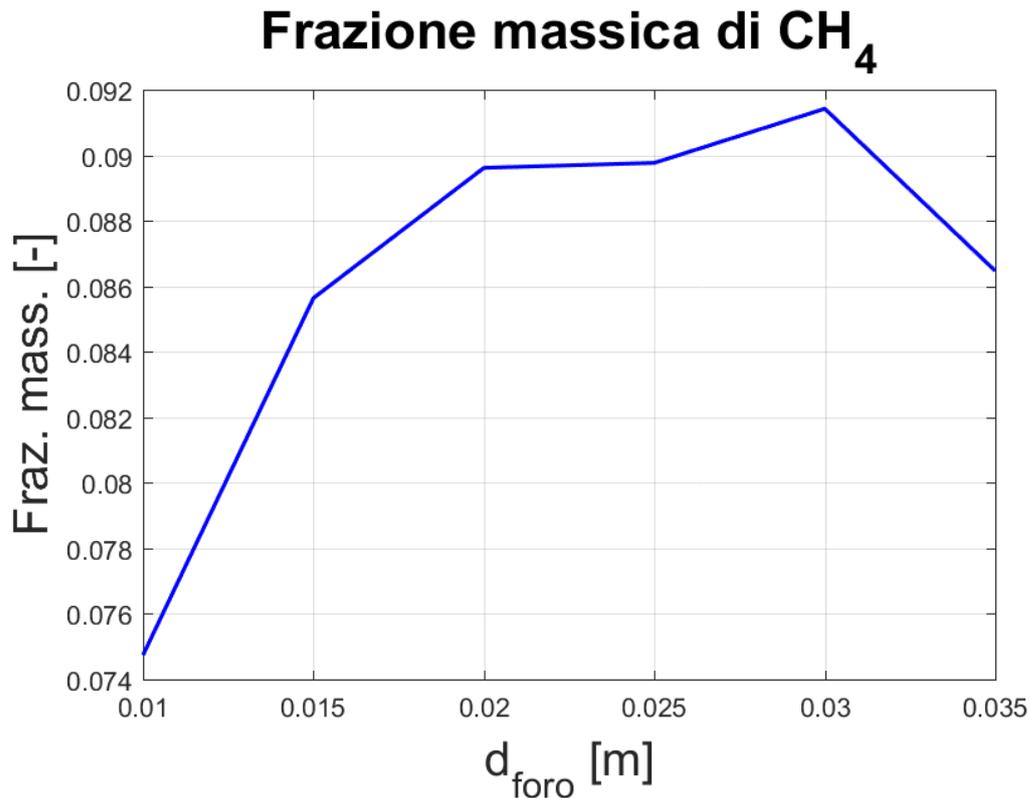


Figura 4.7: Andamento della frazione massica di CH₄ sulla faccia di uscita

4.3 Studio dei 2 fattori

4.3.1 Caso bidimensionale

A questo punto è stato fissato un parametro, ovvero il diametro di rottura del rilascio. Di conseguenza le nuove assunzioni sono state le seguenti:

- $P_{stoc} = 10 \text{ bar}$
- $d_{foro} = 1 \text{ cm}$
- $\frac{l}{d_{cyl}} = 1.5$
- $L_{SB} = 0.46 \text{ m}$

A seguito di queste assunzioni si è deciso di far variare il diametro dell'ostacolo in un range da 6 cm a 21 cm ed in tutti i casi si è verificato la formazione di un getto estremamente sottoespanso. I risultati indicano un trend significativo all'intero dell'intervallo $d_{cyl} = 9 - 17 \text{ cm}$.

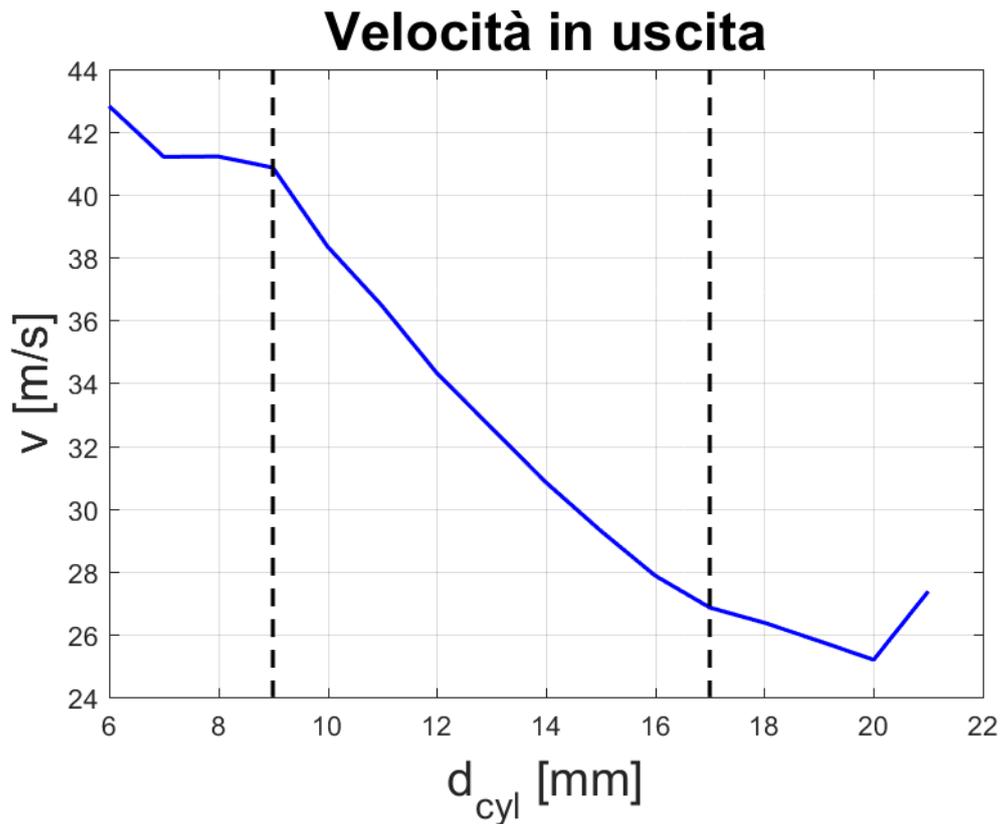


Figura 4.8: Velocità sulla faccia d'uscita al variare del diametro dell'ostacolo

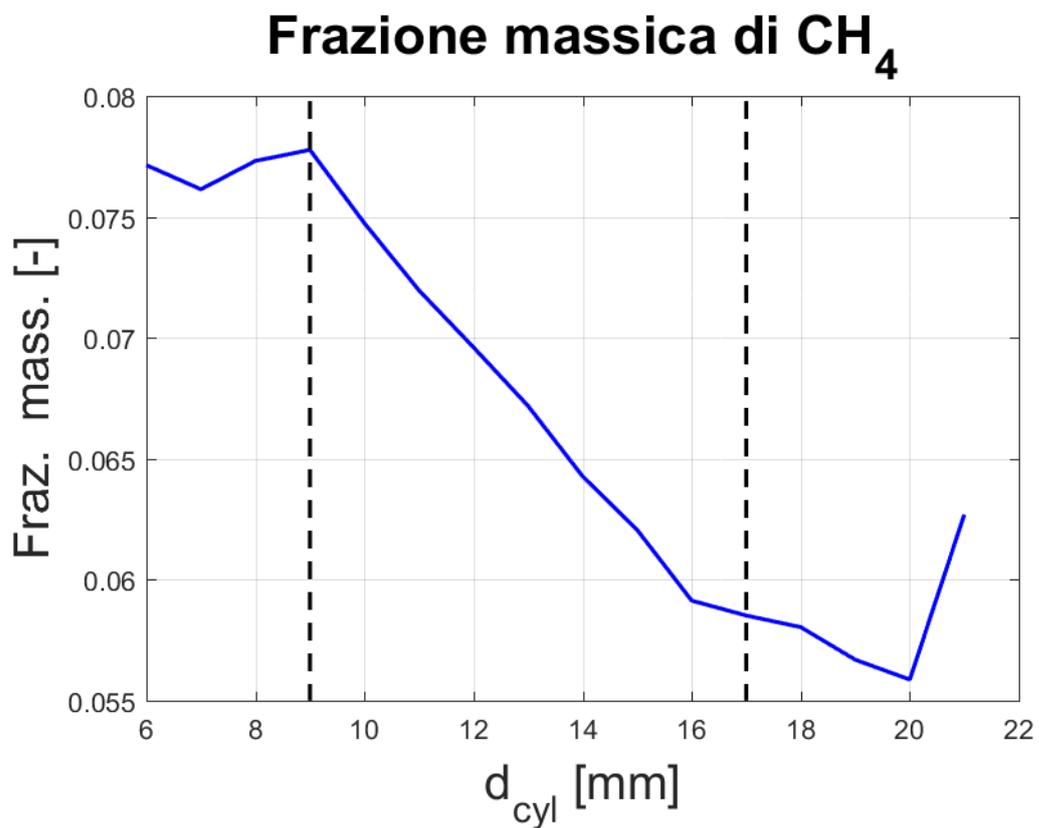


Figura 4.9: Frazione massica di CH₄ sulla faccia d'uscita al variare del diametro dell'ostacolo

Come è possibile osservare all'interno di questo intervallo le grandezze di interesse presentano un andamento lineare, questo permette di evidenziare un trend ben preciso all'interno del cui si può predire l'andamento delle grandezze caratteristiche del fenomeno. Come è possibile vedere in Fig.4.8 la velocità del flusso decresce al crescere della dimensione caratteristica dell'ostacolo, in quanto l'impatto con l'ostacolo che rallenta il flusso diventa un fenomeno sempre più dominante. Questo trend è dovuto ad uno sviluppo simile a livello fluidodinamico del getto nei vari casi di interesse.

A sinistra dell'intervallo lineare non è possibile apprezzare un andamento chiaro, in quanto la vicinanza dell'ostacolo al punto di rilascio condiziona fortemente il getto impendendo uno sviluppo analogo al caso precedente, come visibile in Fig.4.10. A destra dell'intervallo è possibile vedere come l'andamento non presenti un trend preciso, in quanto l'interazione tra flusso e ostacolo è fortemente condizionata dalla dimensione della Source Box che non permette al flusso di richiudersi a valle dell'ostacolo, come illustrato in Fig.4.12.

La decrescita della velocità porta ad una conseguente decrescita di materia trasportata e dunque una minore presenza di metano all'uscita della Source Box.

In seguito vengono riportati alcune grandezze caratteristiche per i casi a 2 cm, 9 cm e 17 cm.

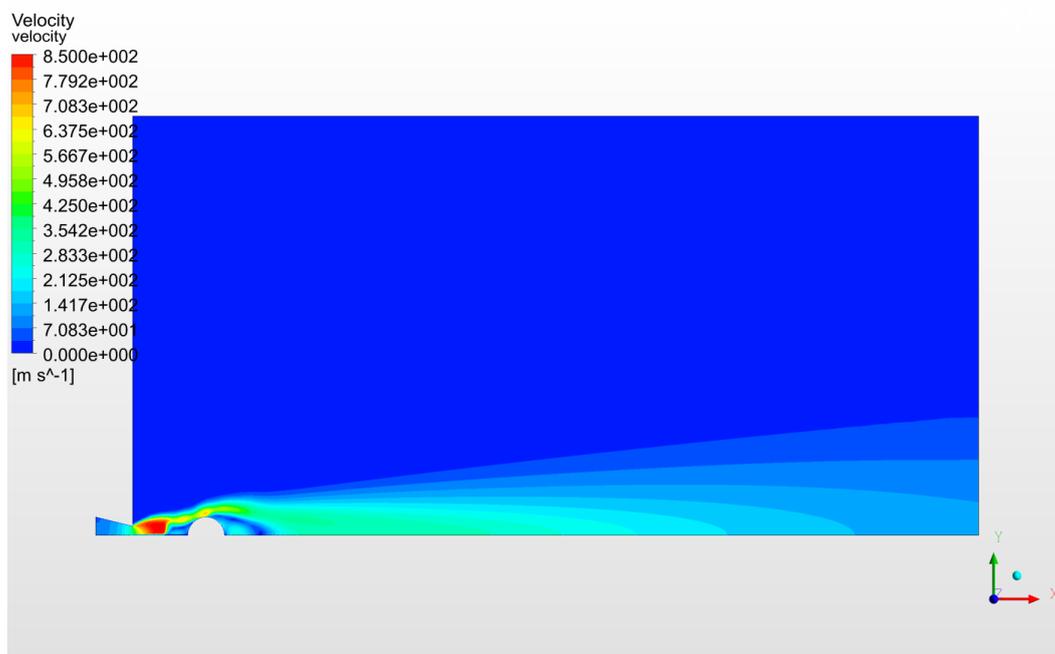


Figura 4.10: Campo di velocità per un ostacolo co $d = 2$ cm

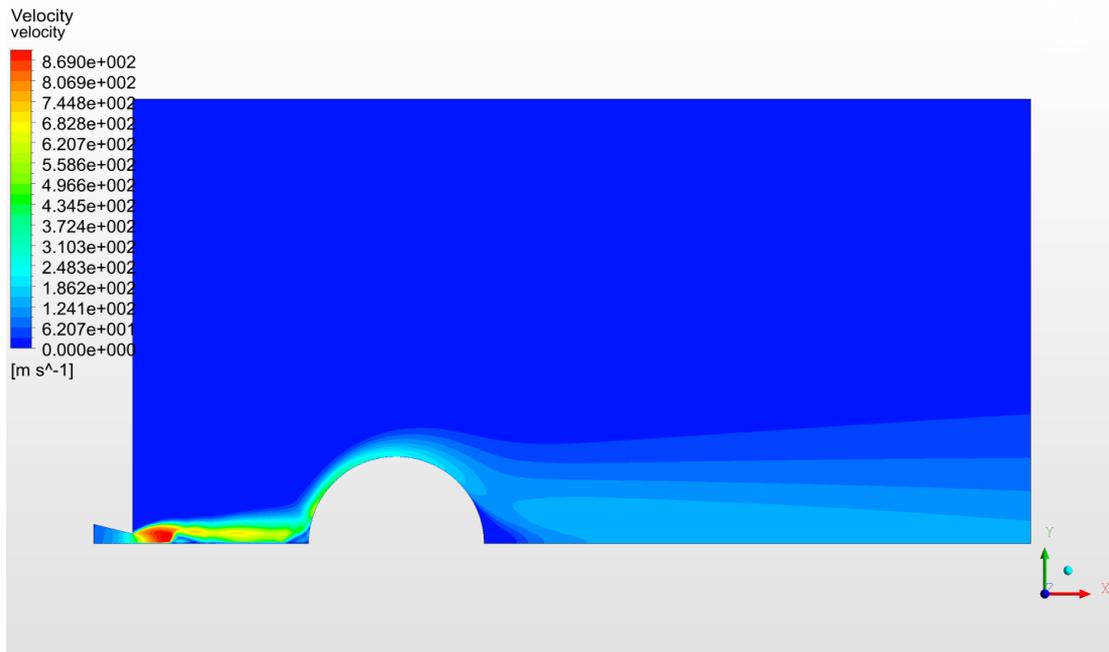


Figura 4.11: Campo di velocità per un ostacolo co $d = 9$ cm

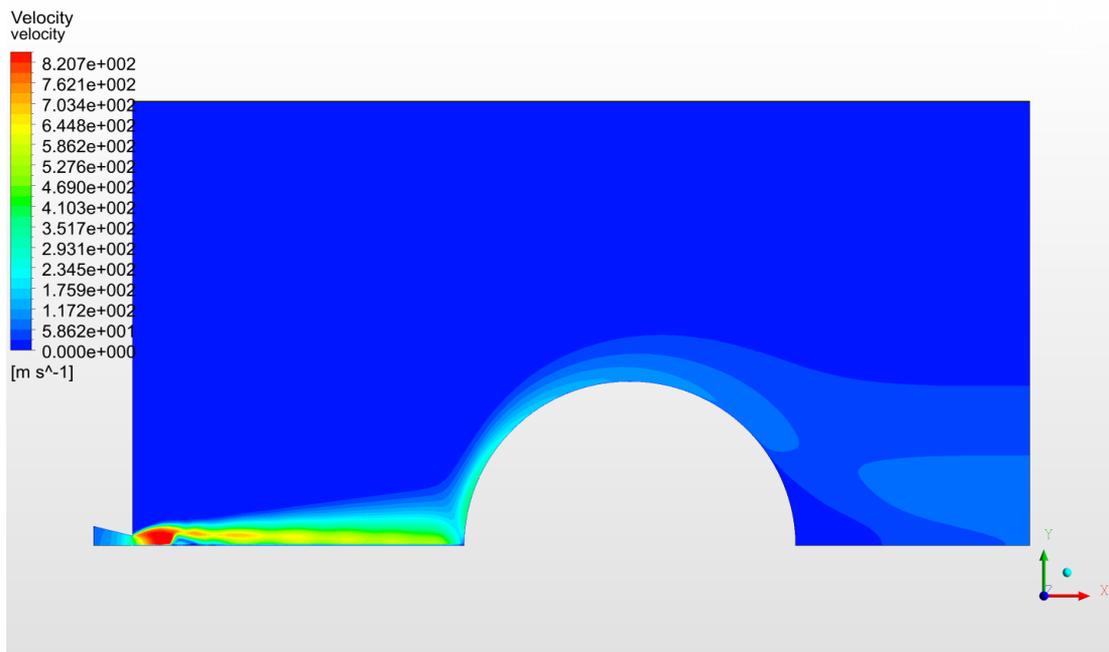


Figura 4.12: Campo di velocità per un ostacolo con $d = 17$ cm

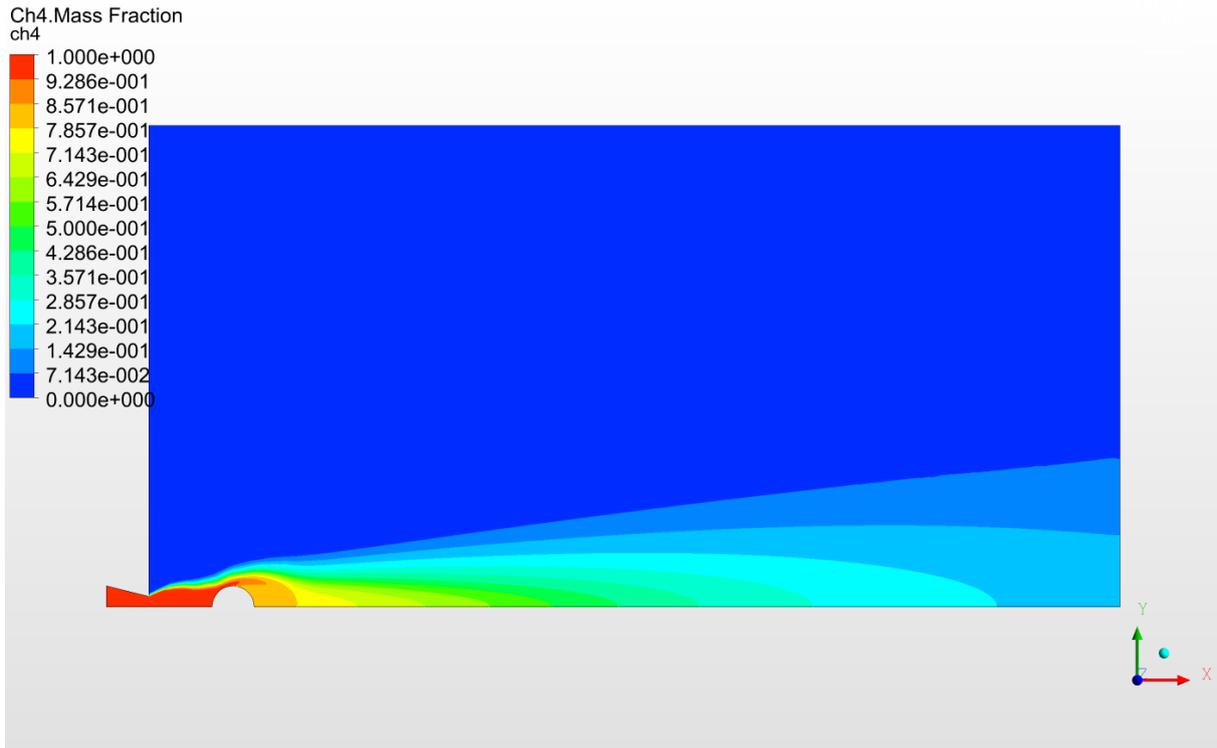


Figura 4.13: Frazione massica di CH₄ per un ostacolo con d = 2 cm

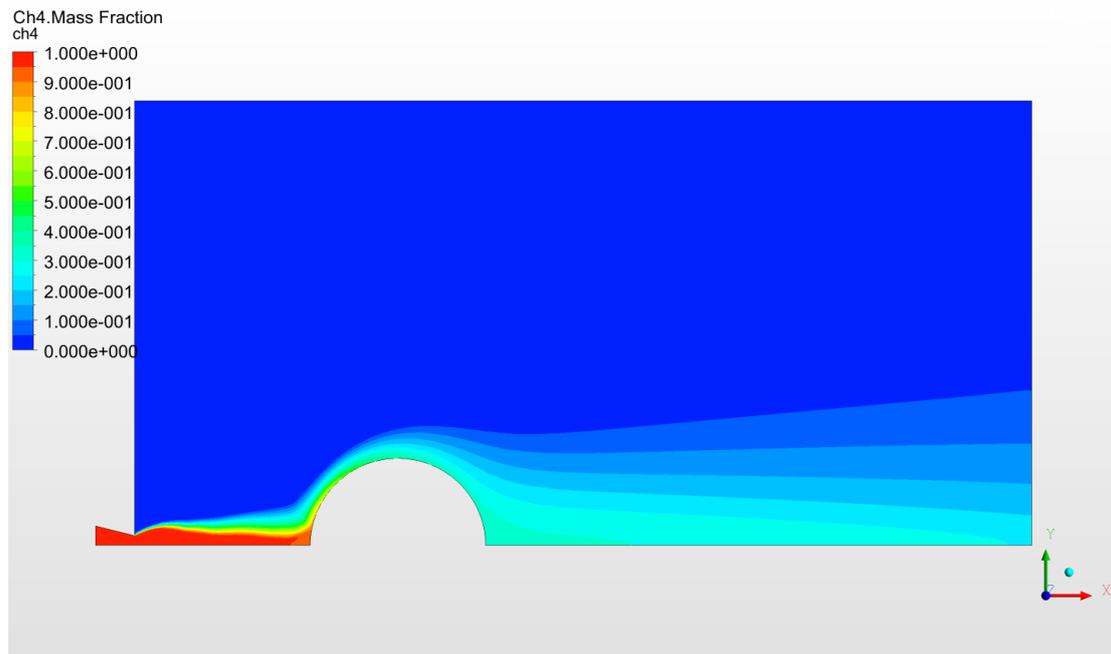


Figura 4.14: Frazione massica di CH₄ per un ostacolo con d = 9 cm

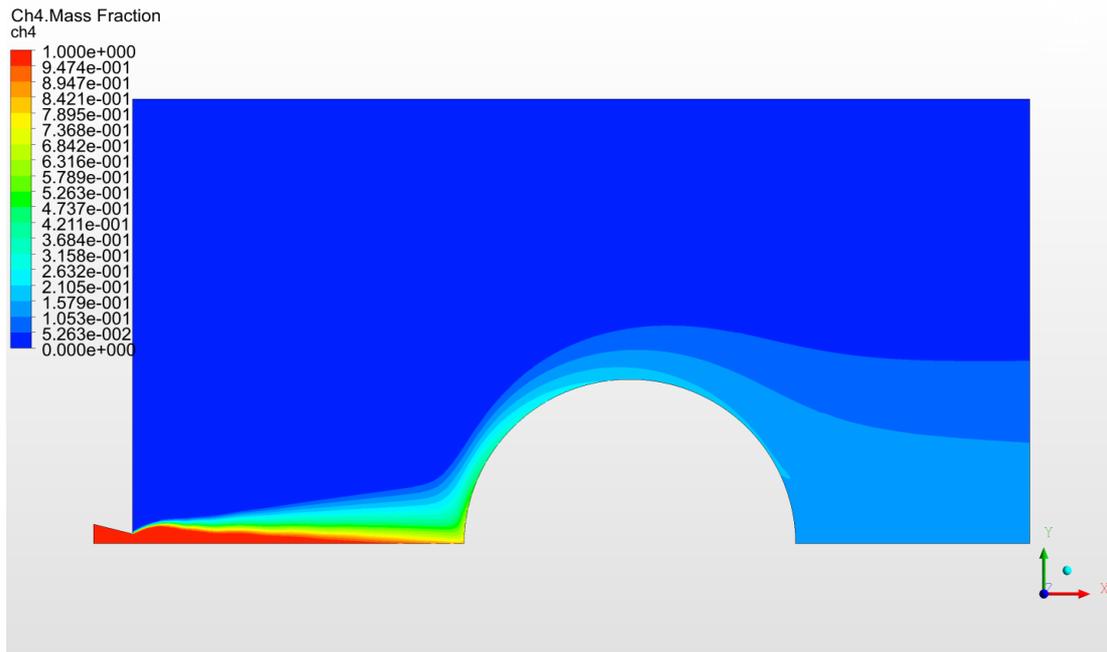


Figura 4.15: Frazione massica di CH₄ per un ostacolo con d = 17 cm

Guardando le Fig.4.13-4.15 di concentrazione massica del metano di può vedere come per diametri più piccoli la quantità di concentrazione di sostanza all'uscita sia più alta rispetto a casi con diametri maggiori, questo è dovuto alla maggiore velocità del getto che risente meno della presenza dell'ostacolo che domina il fenomeno del trasporto di materia.

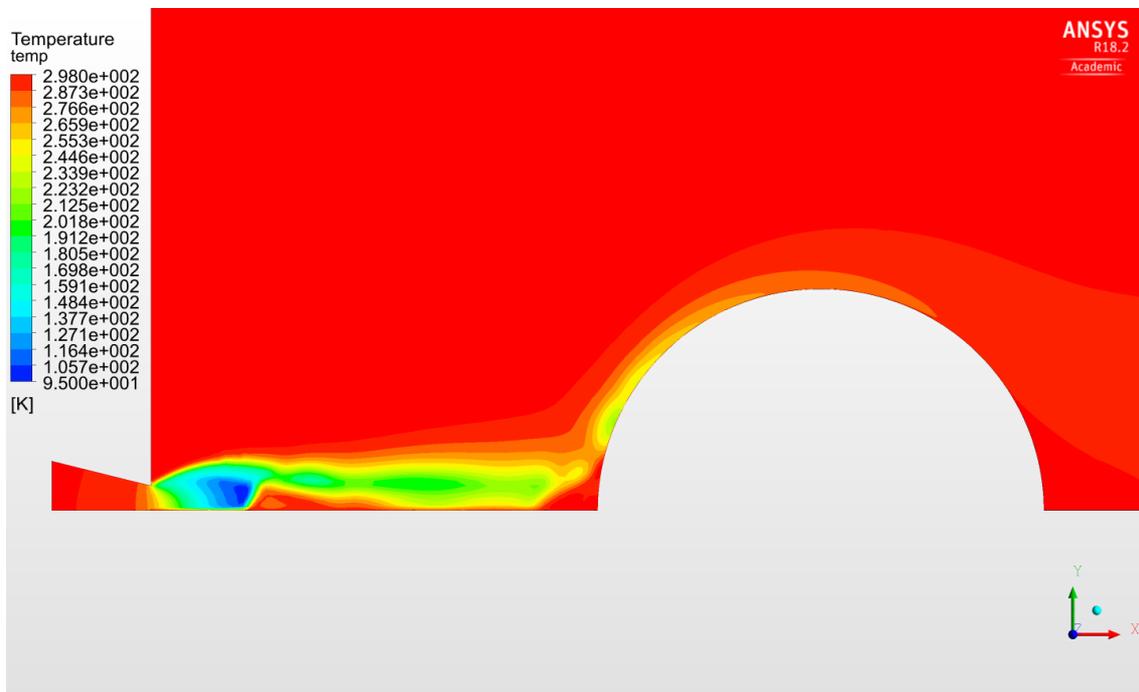


Figura 4.16: Distribuzione della temperatura all'interno del getto

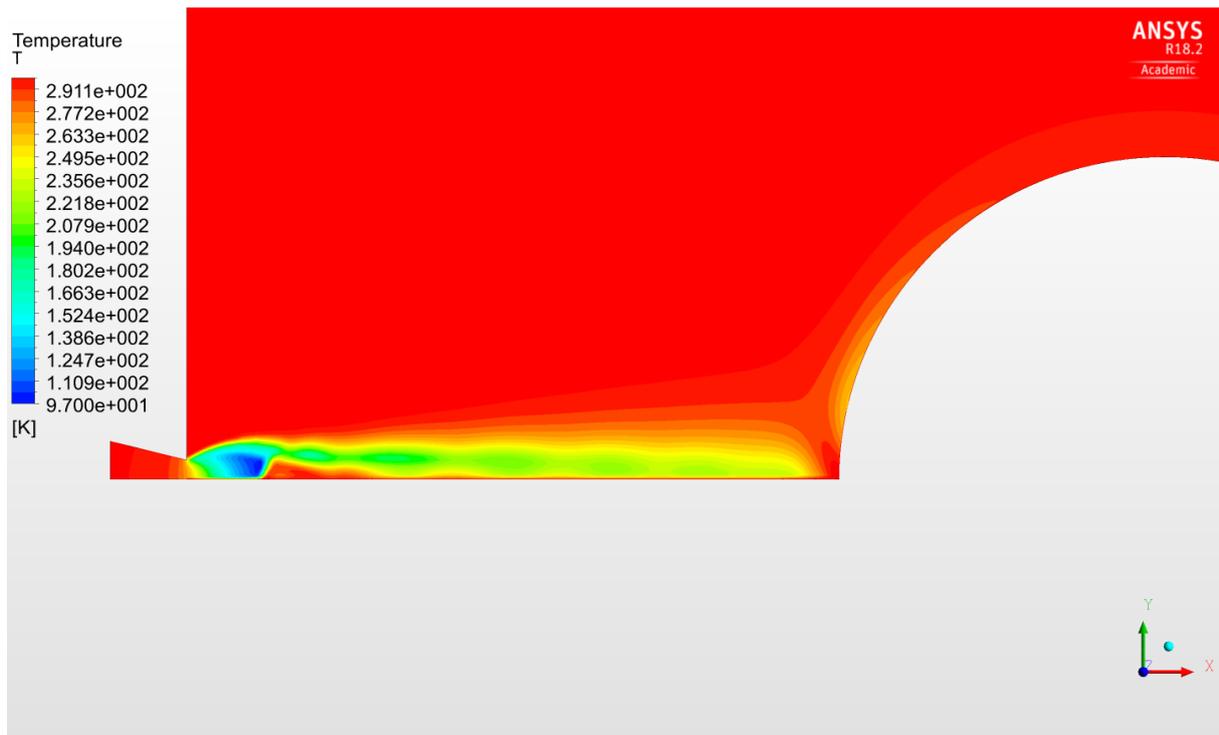


Figura 4.17: Dettaglio allo sbocco della temperatura all'interno del getto

Infine è di particolare interesse vedere come si sviluppa il campo di temperatura. Infatti, possiamo vedere in corrispondenza del disco di Mach, ove si crea una espansione con conseguente decremento di densità, che il getto subisce un forte raffreddamento. Tra l'altro è possibile notare che per il primo caso sulla parete del cilindro la temperatura si discosta notevolmente dalla temperatura ambiente. Questa variazione di temperatura potrebbe essere una seria minaccia per l'ostacolo, quindi il rilascio potrebbe minare, l'integrità strutturale dell'oggetto su cui va ad incidere, creando una nuova fonte di rischio.

4.3.2 Caso tridimensionale

Appurata la presenza di un trend delle grandezze di interesse nel caso bidimensionale, si è deciso di studiare il caso analogo in geometria 3D, in modo da verificare l'adeguatezza dell'analisi preliminare svolta in geometria bidimensionale. Anche in questo caso la pressione di staccaggio è pari a 10 bar e il foro di rottura ha un diametro pari ad 1 cm.

Sono state indagate 4 diverse grandezze:

- Velocità sulla faccia frontale
- Velocità sulla faccia superiore
- Frazione massica di metano sulla faccia frontale
- Frazione massica di metano sulla faccia superiore

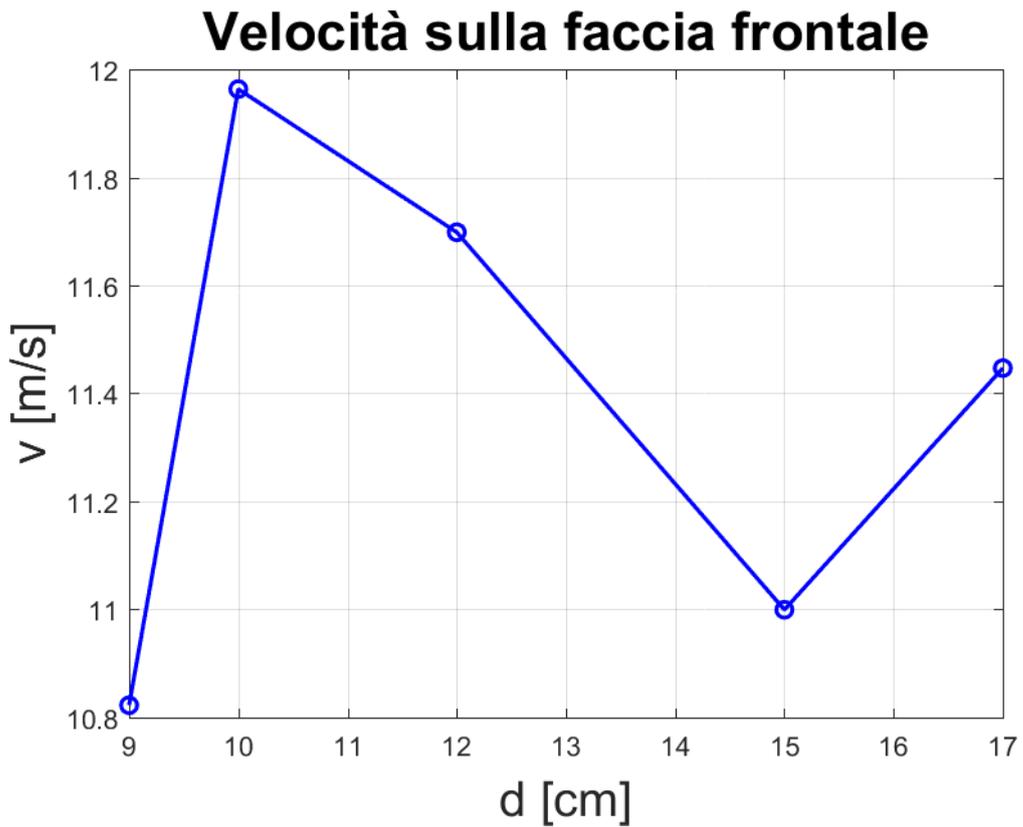


Figura 4.18: Andamento della velocità al variare del diametro sulla faccia frontale al foro

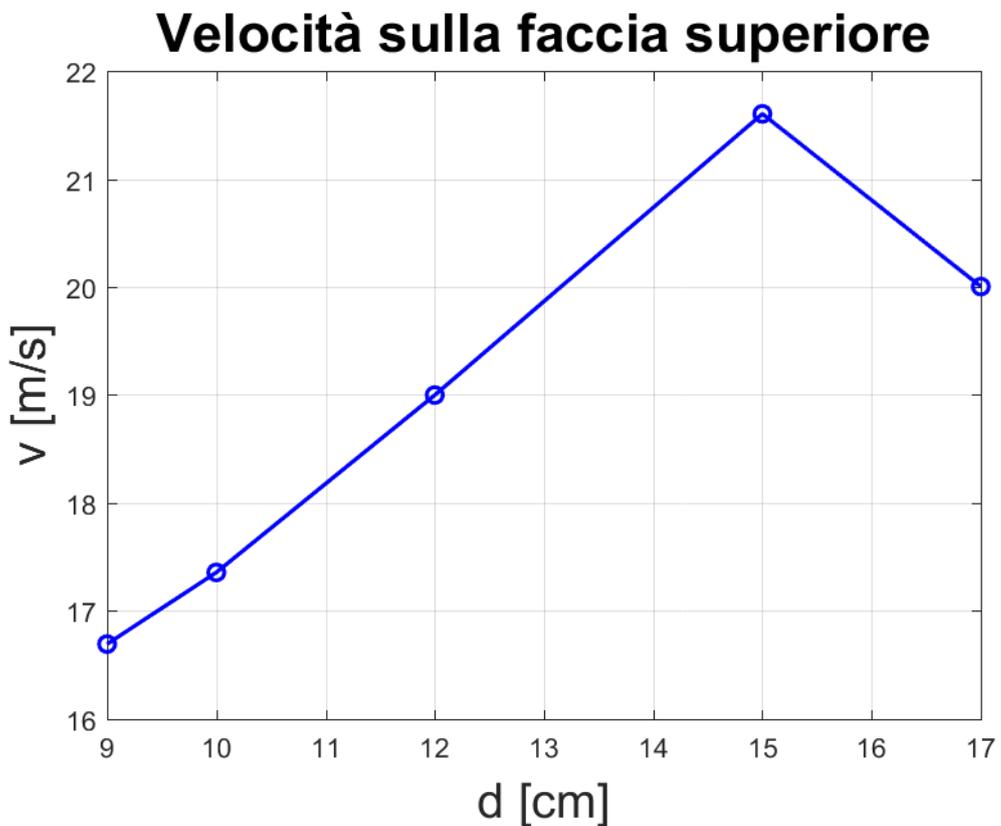


Figura 4.19: Andamento della velocità al variare del diametro sulla faccia superiore del dominio

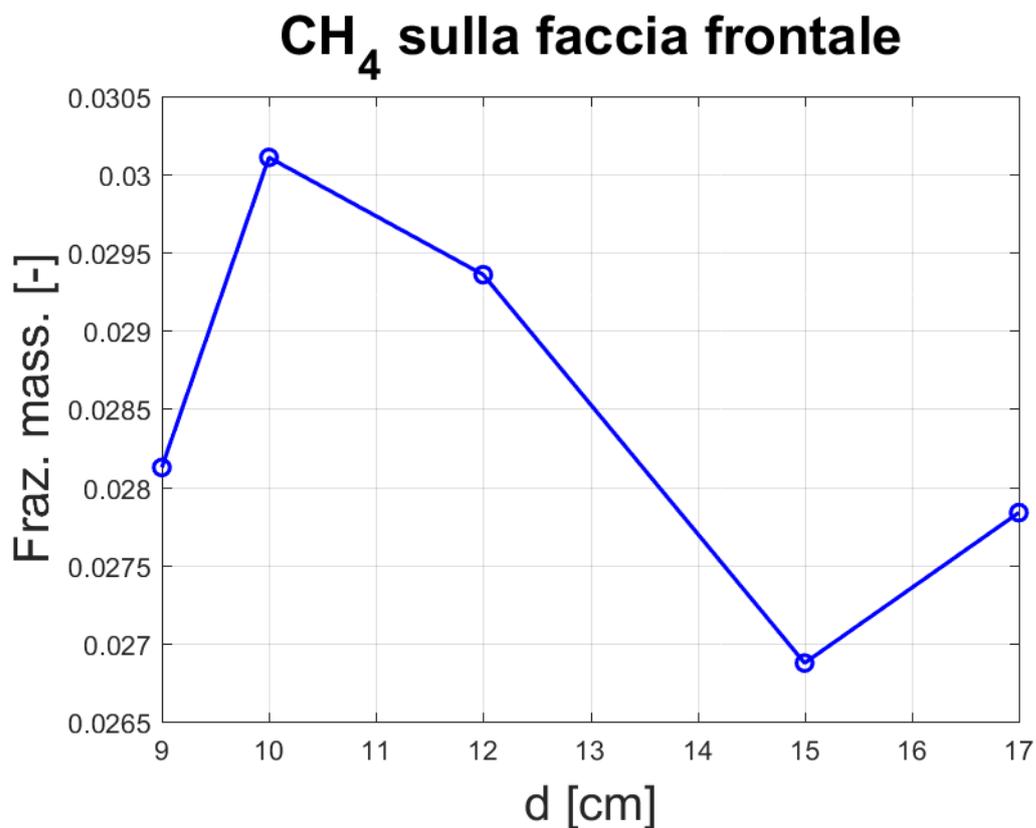


Figura 4.20: Andamento della frazione massica di CH₄ al variare del diametro sulla faccia frontale al foro

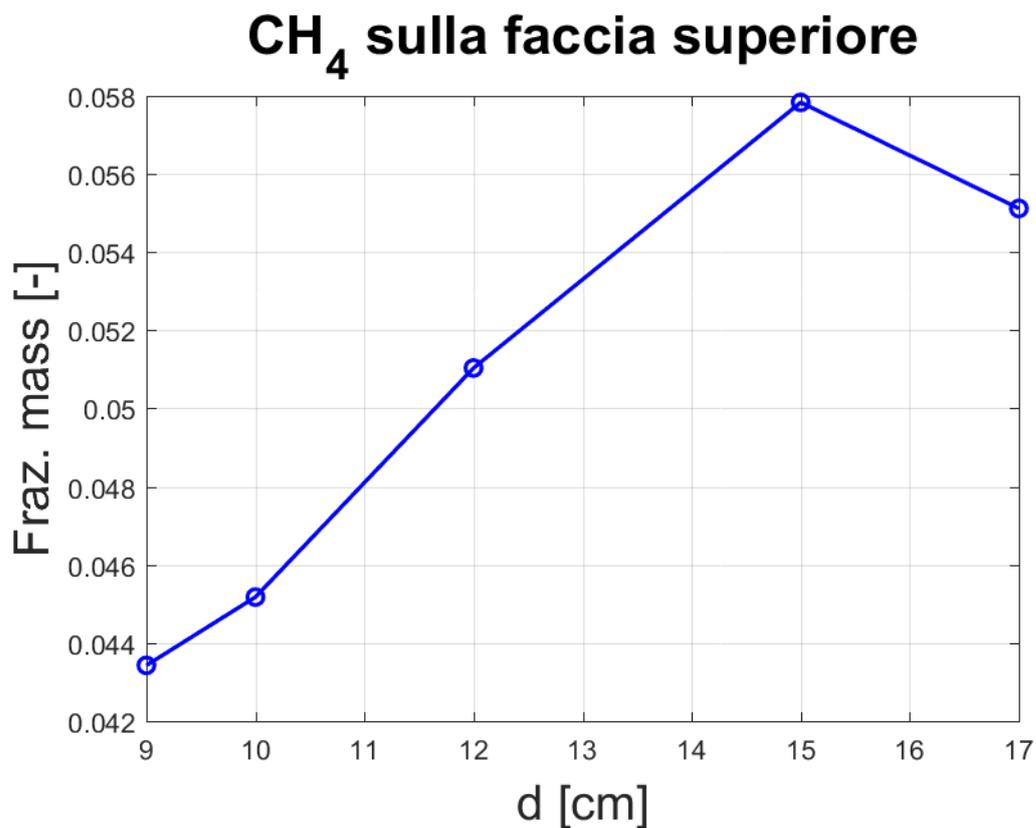


Figura 4.21: Andamento della frazione massica di CH₄ al variare del diametro sulla faccia superiore

Come è possibile vedere anche nel caso 3D ci sono degli andamenti significativi per le grandezze di interesse. Sulla faccia frontale al foro di uscita si registrano eventi analoghi a ciò che è possibile vedere nell'analisi bidimensionale, con un andamento lineare nel da $d = 10$ cm a $d = 15$ cm. Sulla faccia superiore vediamo che l'aumento del diametro comporta linearmente un aumento della velocità del flusso e della sua frazione massica di metano; il getto vede un ostacolo sempre più grande e di conseguenza la porzione di getto che tende ad impennarsi e a trasportare materia è sempre maggiore. Questi trend vengono confermati in un range di diametri dell'ostacolo che va da 10 cm a 15 cm. Questo ci permette di dire che per questo valori di diametro dell'ostacolo si hanno situazioni analoghe con un comportamento prevedibile da parte del getto.

Possiamo quindi visualizzare alcune grandezze caratteristiche:

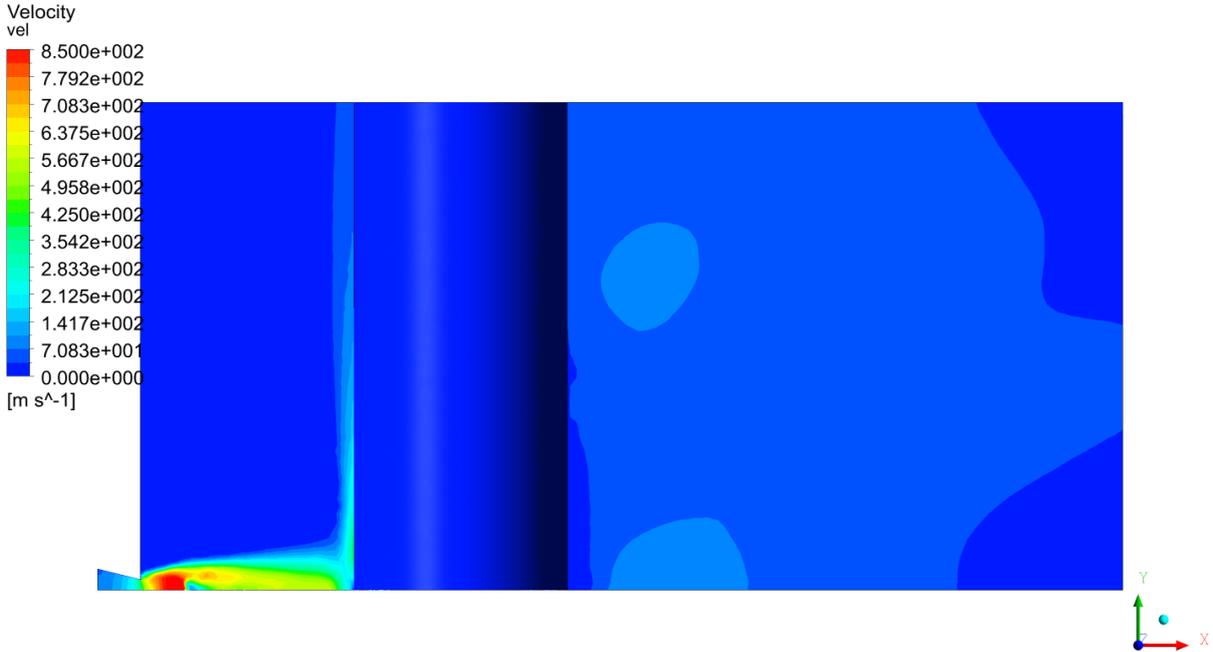


Figura 4.22: Campo di velocità per $d_{cyl} = 10$ cm

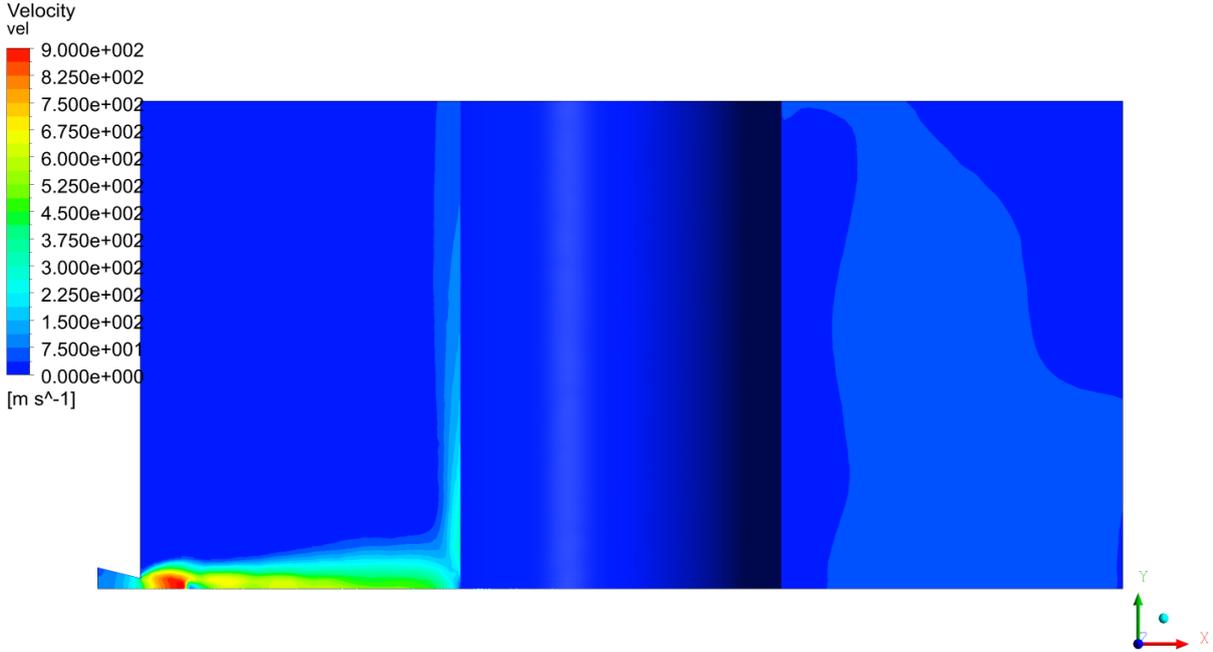


Figura 4.23: Campo di velocità per $d_{cyl} = 15$ cm

Come è possibile vedere nel primo caso il getto incontra l'ostacolo ad una distanza minore e impatta a velocità maggiori rispetto al secondo caso. Inoltre, è possibile osservare dal campo di velocità a valle del cilindro come un ostacolo di diametro maggiore smorza in maniera più efficace il getto.

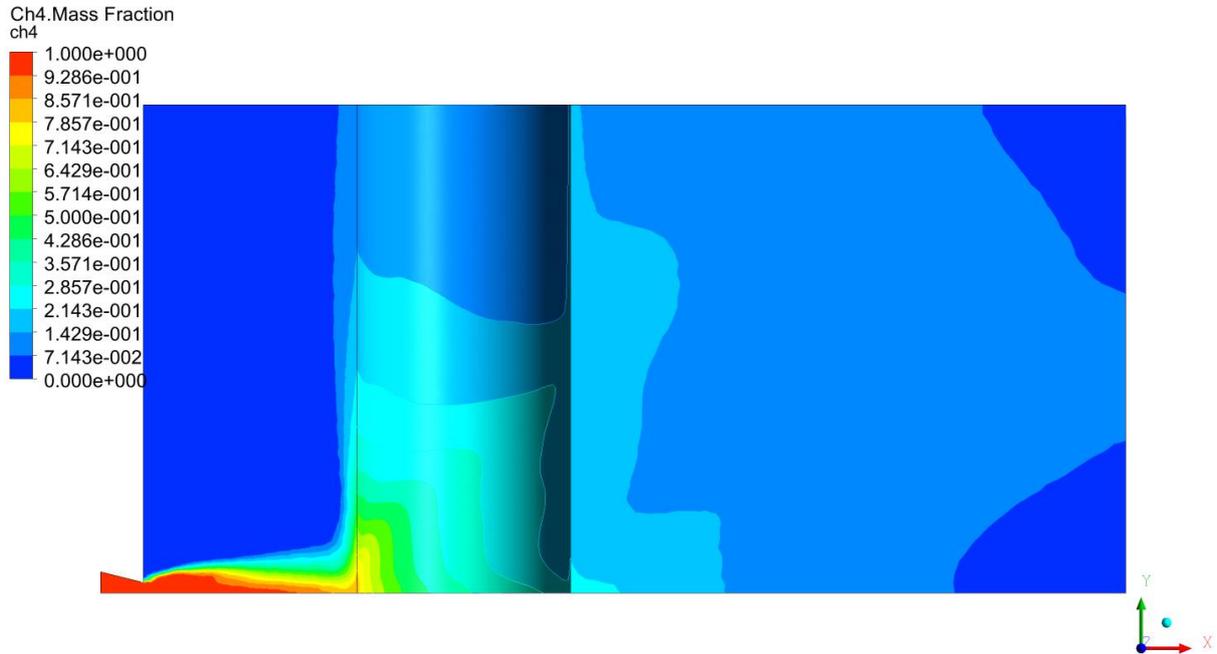


Figura 4.24: Distribuzione spaziale della frazione massica di CH₄ per $d_{cyl} = 10$ cm

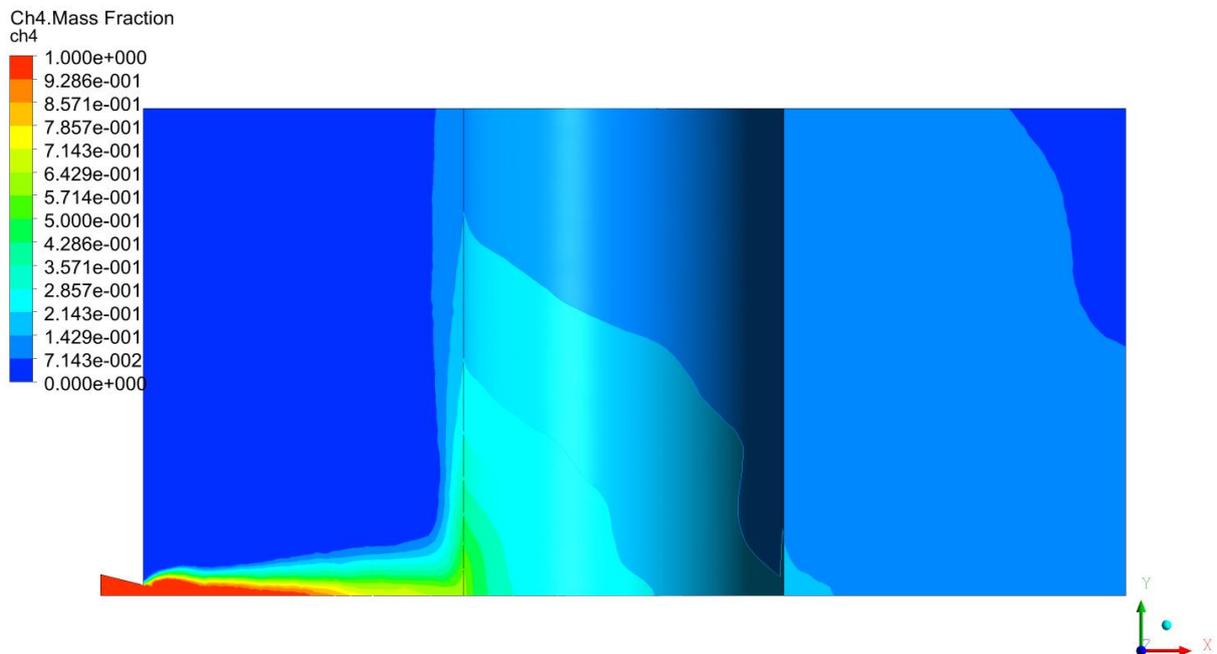


Figura 4.25: Distribuzione della frazione massica di CH₄ per $d_{cyl} = 15$ cm

Nelle immagini che rappresentano la distribuzione spaziale di metano nel dominio è possibile vedere come nel primo caso il getto impatti all'ostacolo evidenziando una zona interna del getto non ancora miscelata con l'ambiente esterno. Questo conferma anche l'ipotesi precedente per cui il getto arriva a velocità molto alte e non si è ancora miscelato con l'aria tramite il fenomeno di entrainment.

4.4 Studio al variare del rapporto l/d_{cyl}

Successivamente è proseguito lo studio sull'influenza che l'ostacolo possiede all'interno della Source Box. Il passo seguente è stato considerare il range di diametri di interesse individuati nei paragrafi precedenti, ovvero $d_{cyl} = 9 \div 17\text{cm}$, e studiare come cambiano le condizioni all'interno della Source Box facendo variare il rapporto tra la distanza foro-cilindro e il diametro dell'ostacolo (l/d_{cyl}) a diametro del cilindro fissato.

Allora il rapporto tra queste due grandezze ha assunto i valori riportati:

$$r = \frac{l}{d_{cyl}} = 1 - 1.25 - 1.5 - 1.75 - 2$$

L'analisi in questione ci ha restituito i seguenti risultati:

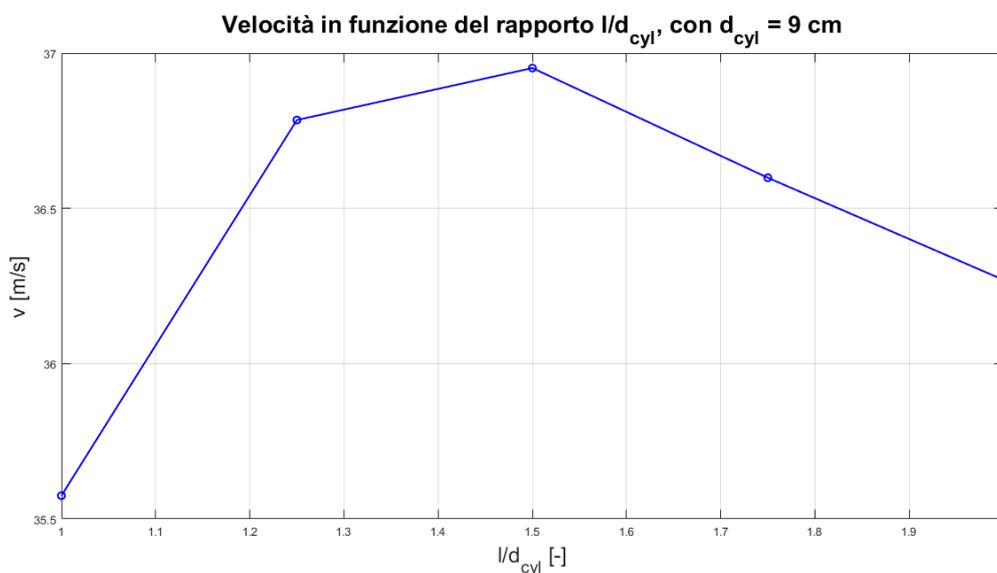


Figura 4.26: Velocità sulla faccia d'uscita al variare del rapporto l/d_{cyl} per $d_{cyl} = 9\text{ cm}$

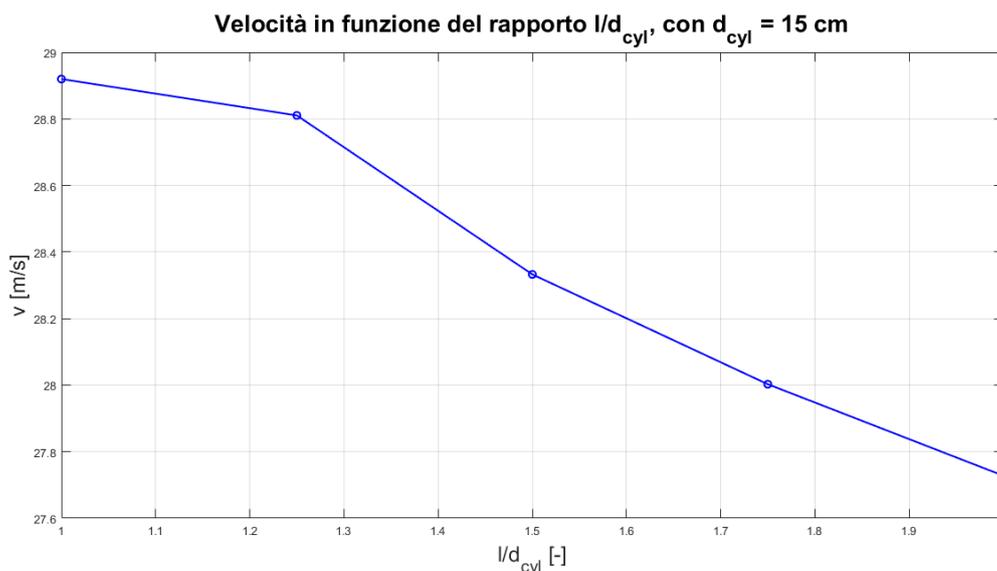


Figura 4.27: Velocità sulla faccia d'uscita al variare del rapporto l/d_{cyl} per $d_{cyl} = 15\text{ cm}$

È possibile vedere come per un ostacolo di $d_{cyl} = 9\text{ cm}$ con valori di l/d_{cyl} troppo bassi ci si trovi in una zona dove l'ostacolo smorza la velocità del getto prima che possa raggiungere un campo

di moto che gli permetta di aderire al cilindro in modo che l'effetto Coanda diventi un fenomeno rilevante. Questo stato di moto inizia ad essere visualizzato da rapporti l/d_{cyl} maggiori di 1.5. Mentre per un $d_{cyl} = 15$ cm la velocità del flusso decresce in tutto il range di interesse mostrandoci come più tardi il getto impatta sull'ostacolo più la velocità diminuisce, dovuto al fatto che il getto perde parte della sua energia cinetica durante il percorso, prima di impattare l'ostacolo. È infine importante notare come per un diametro più grande la velocità con cui il flusso esce dalla Source Box è sempre minore, indipendentemente dal rapporto, quindi è rilevante l'effetto di smorzamento che l'ostacolo compie sul flusso.

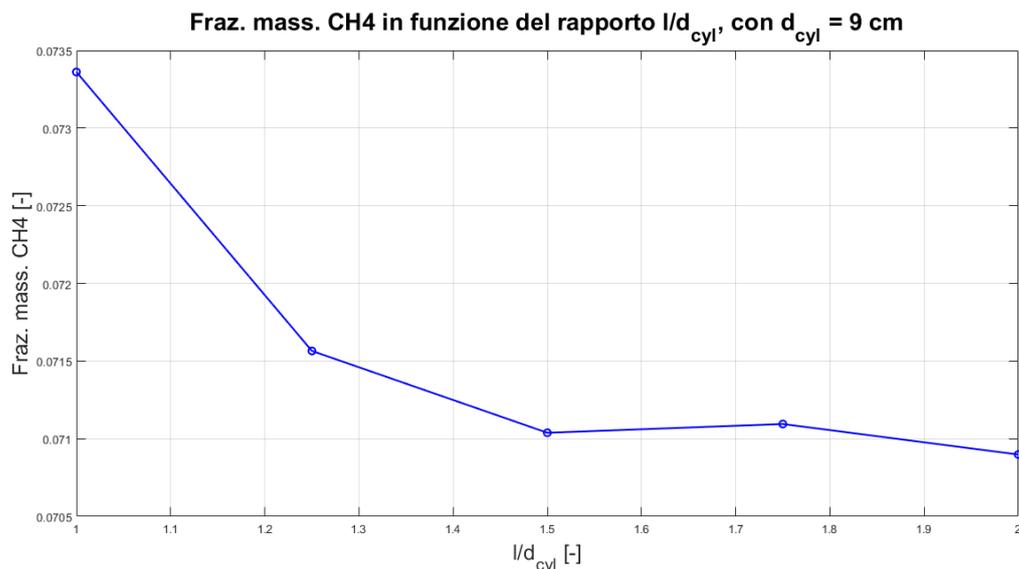


Figura 4.28: Frazione massica sulla faccia d'uscita al variare del rapporto l/d_{cyl} per $d_{cyl} = 9$ cm

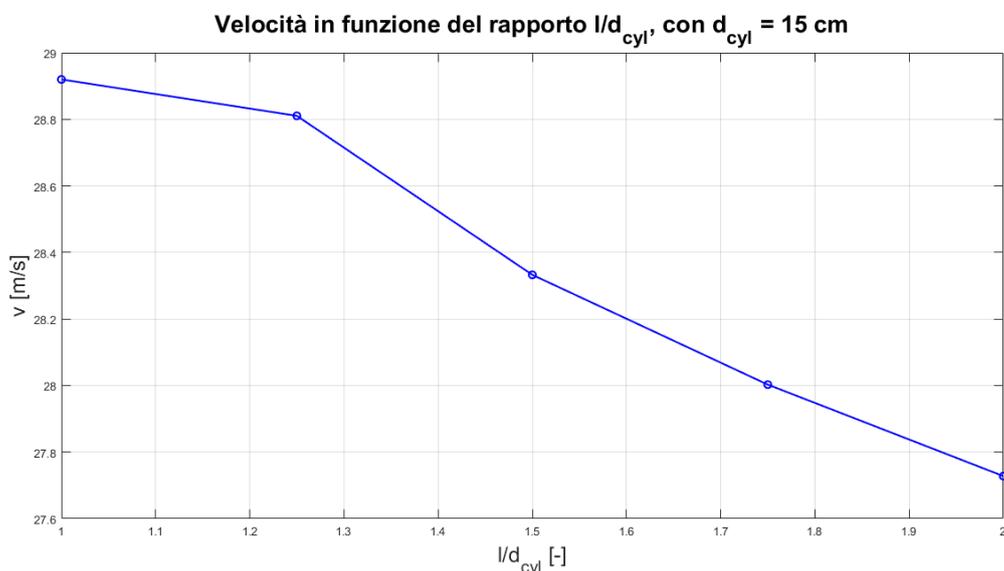


Figura 4.29: Frazione massica sulla faccia d'uscita al variare del rapporto l/d_{cyl} per $d_{cyl} = 15$ cm

L'influenza del diametro è visibile anche sulla frazione massica di CH_4 che fuoriesce dalla Source Box, questa si attesta costantemente su valori maggiori per diametri minori. È poi possibile notare che al crescere del rapporto per diametri piccoli la frazione massica di metano ha una vertiginosa decrescita sino a $l/d_{cyl} \sim 1.5$, per poi passare ad una decrescita molto lenta. Mentre per diametri più grandi si può vedere come la decrescita della frazione di metano sia maggiormente graduale, con un andamento analogo al grafico di velocità.

A questo punto è interessante visualizzare in un solo grafico l'andamento della velocità e della frazione massica di sostanza per i diversi diametri al variare del rapporto tra distanza e diametro del cilindro.

Successivamente per ogni diametro è stato calcolato un valore medio sia di velocità che di frazione di metano in modo da costruire una curva di valori medi. Su questa curva si è deciso di calcolare un errore $\leq 3\%$ per ogni diametro in modo da verificare se tutte le curve fossero all'interno di questo range di errore, ritenuto accettabile. Come è possibile vedere in Fig.4.30 questa aspettativa è stata rispettata e tramite questo risultato è possibile dire che per un dato diametro non è più fondamentale definire anche la distanza tra foro e oggetto se si considera una distanza che varia come $l = d_{cyl} \div 2d_{cyl}$. Infatti, ai fini dell'analisi di dispersione è possibile utilizzare una sola simulazione con il nostro diametro di interesse per ricoprire un certo numero di casi. Dunque per un ostacolo di diametro fissato sarà necessaria una sola simulazione per definire l'influenza dell'ostacolo sulla nube di dispersione e le conseguenti aree di danno.

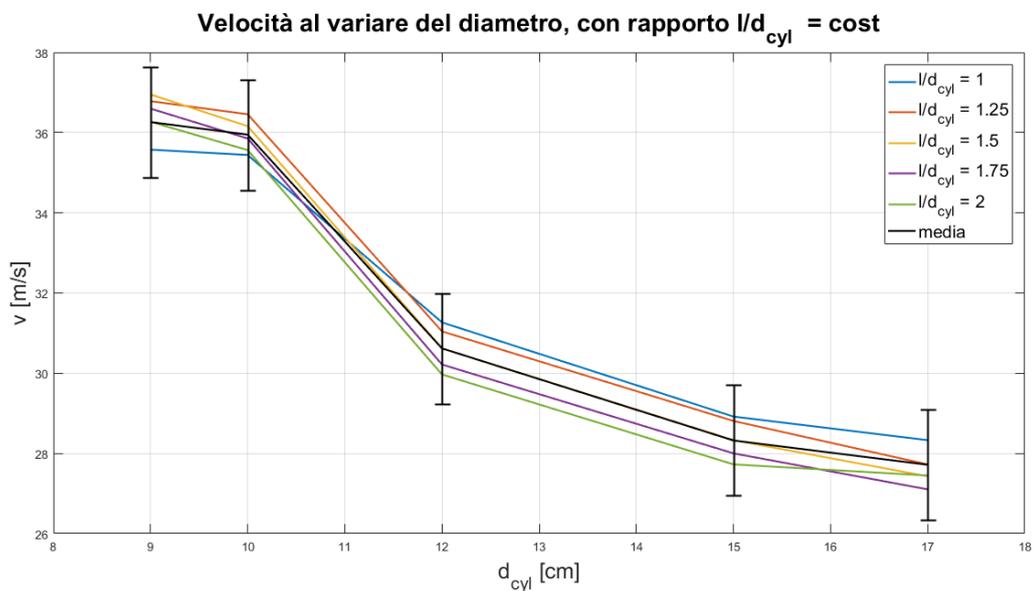


Figura 4.30: Curve di velocità per diversi valori di diametro dell'ostacolo

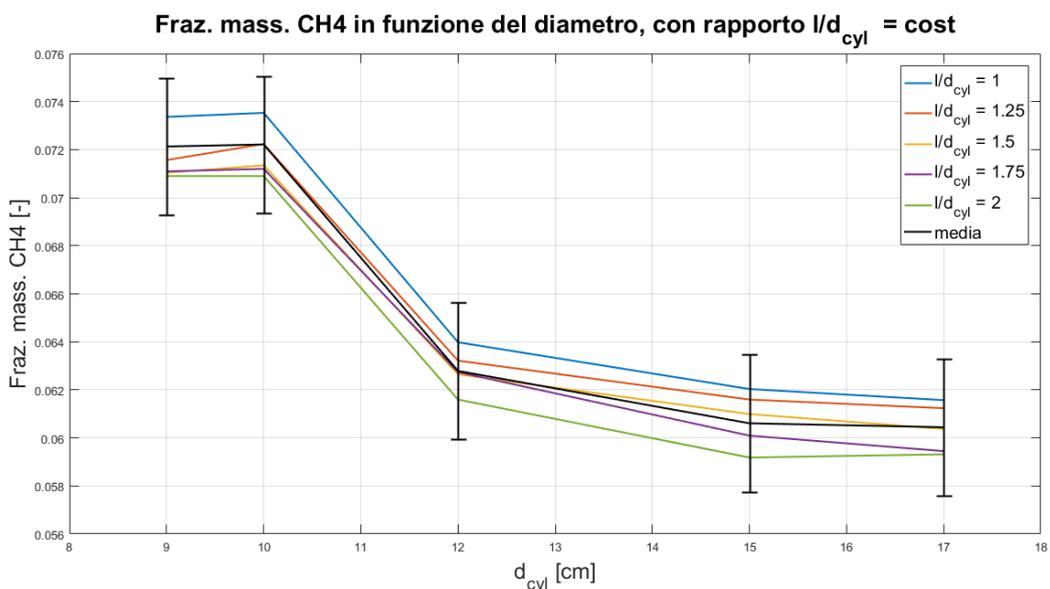


Figura 4.31: Frazione massica di CH₄ per diversi valori di diametro dell'ostacolo

Il medesimo scenario è osservabile sia nello studio della velocità del flusso che della frazione massica di CH_4 .

Questo risultato ci permette quindi di diminuire il numero di Source Box da studiare ai fini di costruire una libreria di casistiche incidentali, ad esempio per un ostacolo con $d_{\text{cyl}} = 10 \text{ cm}$ sarà possibile usare una sola simulazione a $l/d_{\text{cyl}} = 1.5$ invece che realizzare 5 diverse simulazioni al variare del rapporto l/d_{cyl} .

4.5 Analisi dei profili spaziali

Come detto in precedenza per la fase di dispersione vengono utilizzati in input le distribuzioni spaziali di velocità e frazione massica di CH_4 . Si è dunque deciso di indagare nel dominio 2D le distribuzioni spaziali delle grandezze significative coinvolte utilizzando i casi analizzati nel paragrafo precedente.

Sono stati considerati i diametri: 9 cm – 10 cm – 12 cm – 15 cm – 17 cm , e per ogni diametro sono stati studiati i rapporti l/d pari a: 1 – 1.25 – 1.5 – 1.75 – 2 .

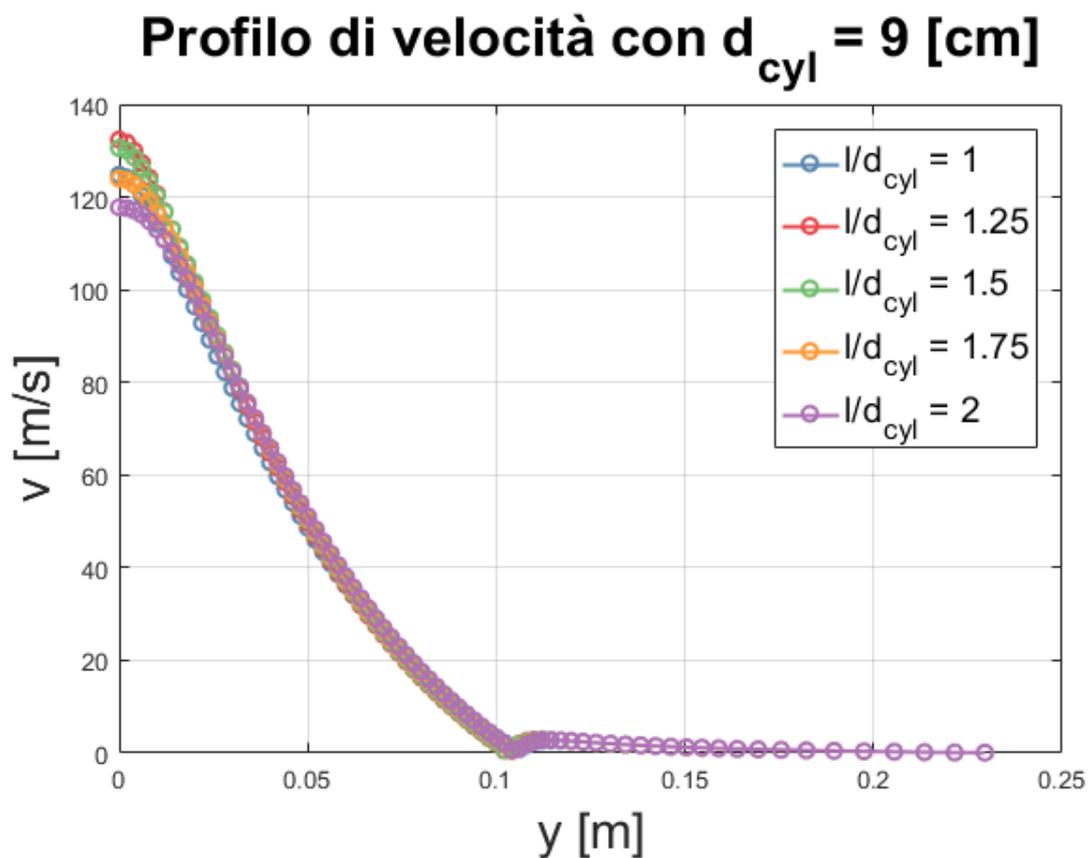


Figura 4.32: Profili spaziali di velocità al variare di l/d per $d = 9 \text{ cm}$

Profilo di velocità con $d_{cyl} = 10$ [cm]

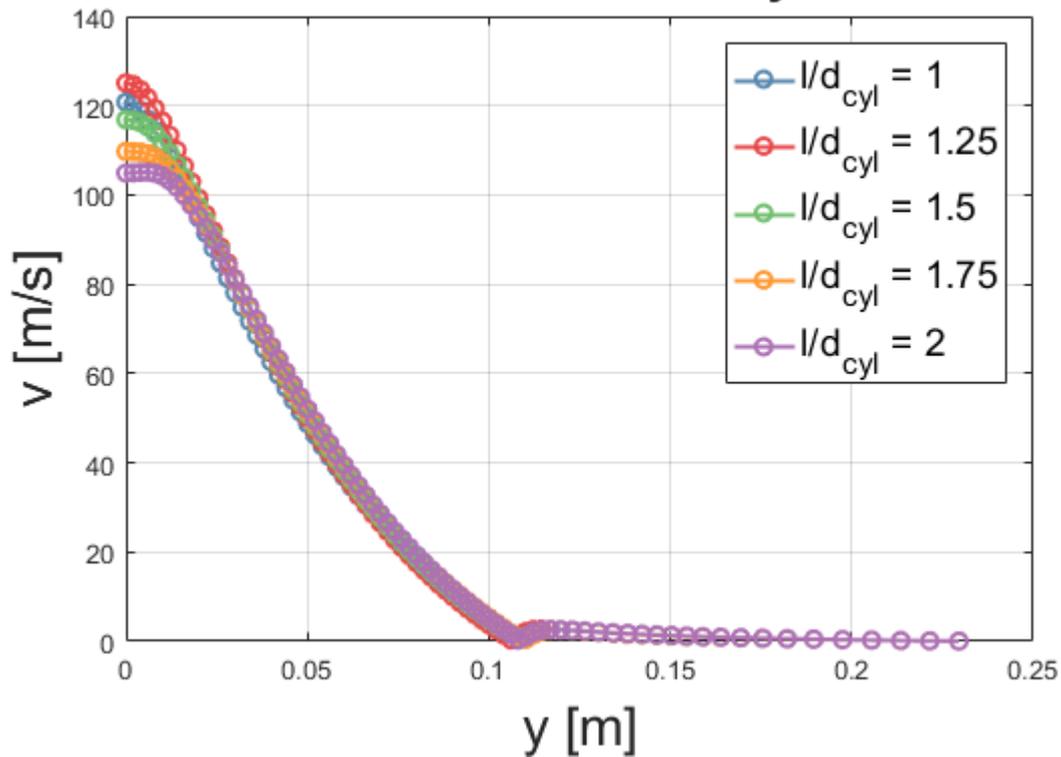


Figura 4.33: Profili spaziali di velocità al variare di l/d per $d = 10$ cm

Profilo di velocità con $d_{cyl} = 12$ [cm]

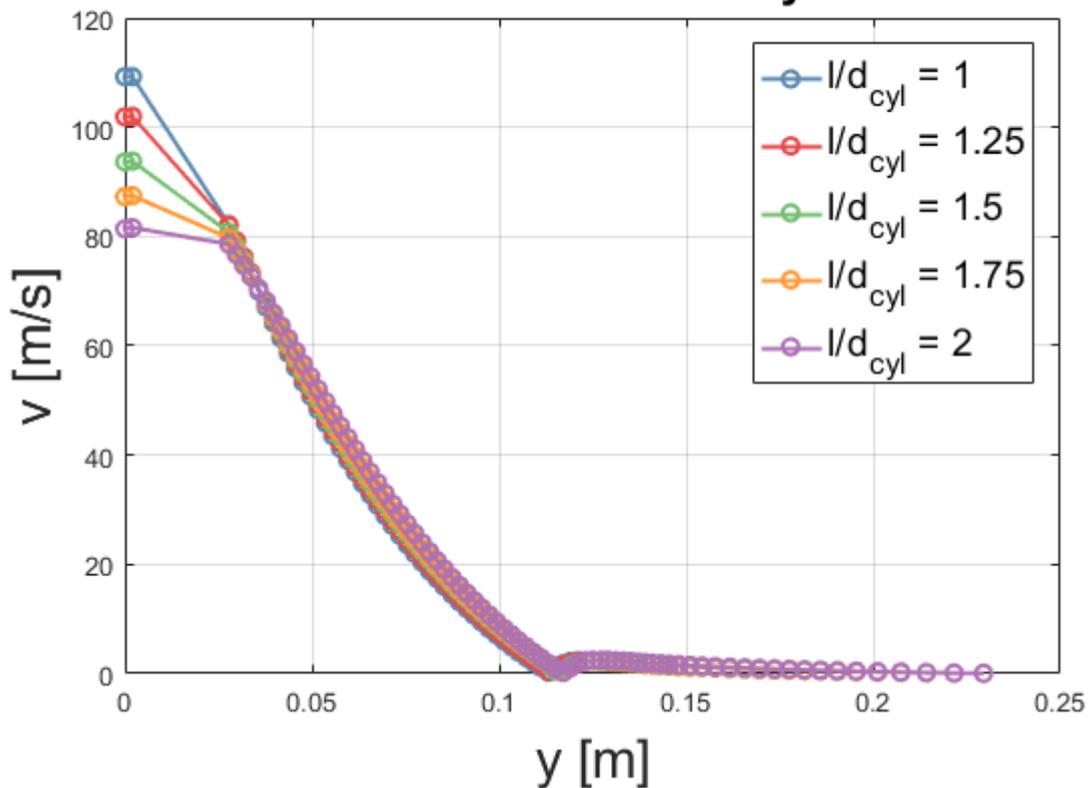


Figura 4.34: Profili spaziali di velocità al variare di l/d per $d = 12$ cm

Profilo di velocità con $d_{cyl} = 15$ [cm]

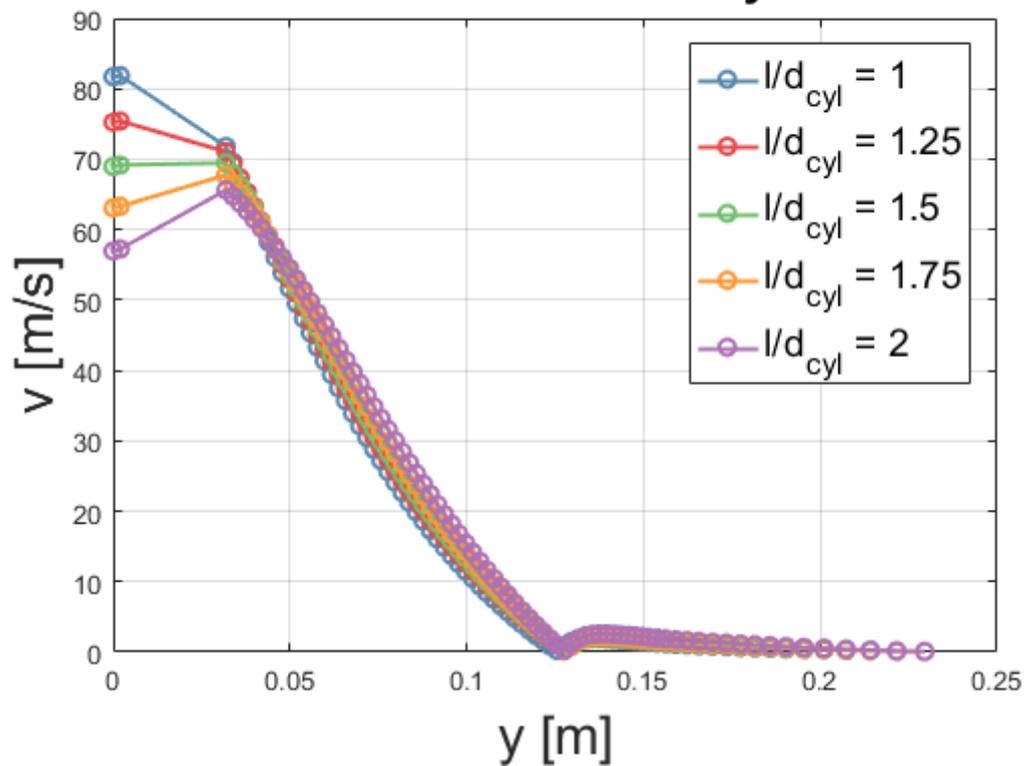


Figura 4.35: Profili spaziali di velocità al variare di l/d per $d = 15$ cm

Profilo di velocità con $d_{cyl} = 17$ [cm]

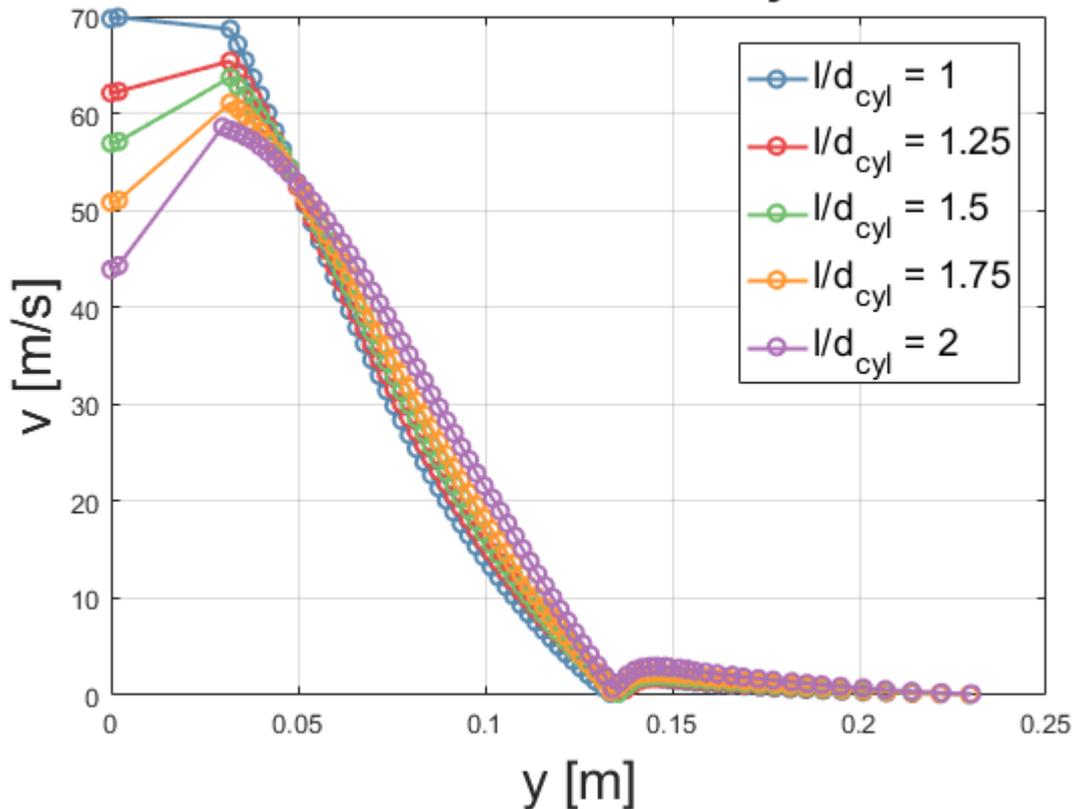


Figura 4.36: Profili spaziali di velocità al variare di l/d per $d = 17$ cm

Dall'analisi svolta sui profili di distribuzione della velocità è possibile vedere come, per un diametro fissato e al variare del rapporto l/d , i profili siano molto simili tra di loro. Questo indica come l'influenza della distanza tra foro e ostacolo sia pressochè ininfluente nei casi esaminati. Questo risultato è concorde alle conclusioni fatte nel paragrafo precedente e ci permette di ridurre notevolmente il numero di casi studio da simulare.

Analizzando i grafici con gli andamenti di velocità è possibile vedere come per i diametri pari a 9 cm, 10 cm e 12 cm, la distribuzione rispetta un trend gaussiano in cui il picco di velocità viene registrato sempre sull'asse del foro, grazie al fatto che il flusso riesce ad aderire sulla superficie e ritardare il distacco di vena fluida a valle del cilindro. È possibile notare come i valori di velocità maggiori siano registrati intorno a $l/d \sim 1.25$, mentre per i diametri di 15 cm e 17 cm si hanno velocità maggiori a rapporti l/d più bassi in quanto l'ostacolo è più distante ed influisce meno sui fenomeni allo sbocco dell'ugello. Per diametri grandi il picco delle varie curve si sposta verso destra, questo a causa di una superficie dell'ostacolo più grande che tende a far iniziare prima il distacco di vena fluida e dividere maggiormente il getto non permettendogli di ricompattarsi a valle del cilindro. Questo giustifica anche il motivo per cui più sull'asse del foro le velocità sono maggiori più l'ostacolo è vicino, mentre allontanandosi dall'asse le velocità sono maggiori quando il cilindro è più distante dal foro e prossimo alla faccia della Source Box in quanto il getto risente in maniera più significativa dell'interazione con l'ostacolo.

Profilo di frazione massica di CH₄ con d_{cyl} = 9 [cm]

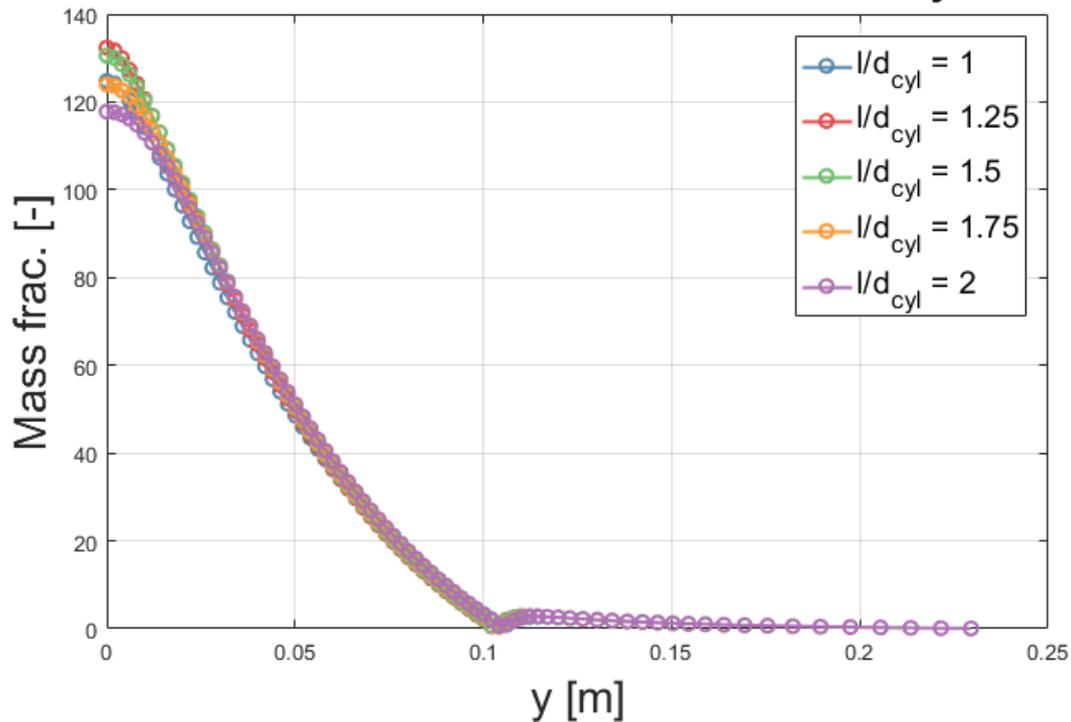


Figura 4.37: Profili spaziali di CH₄ al variare di l/d per d = 9 cm

Profilo della frazione massica di CH₄ con d_{cyl} = 10 [cm]

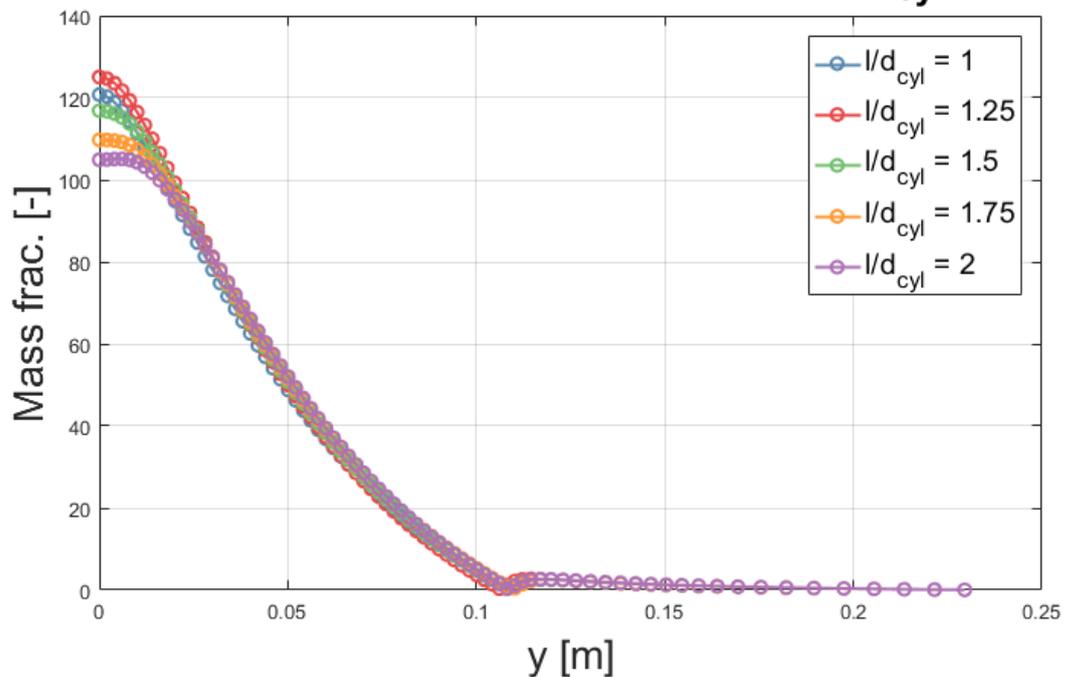


Figura 4.38: Profili spaziali di CH₄ al variare di l/d per d = 10 cm

Profilo della frazione massica di CH₄ con d_{cyl} = 12[cm]

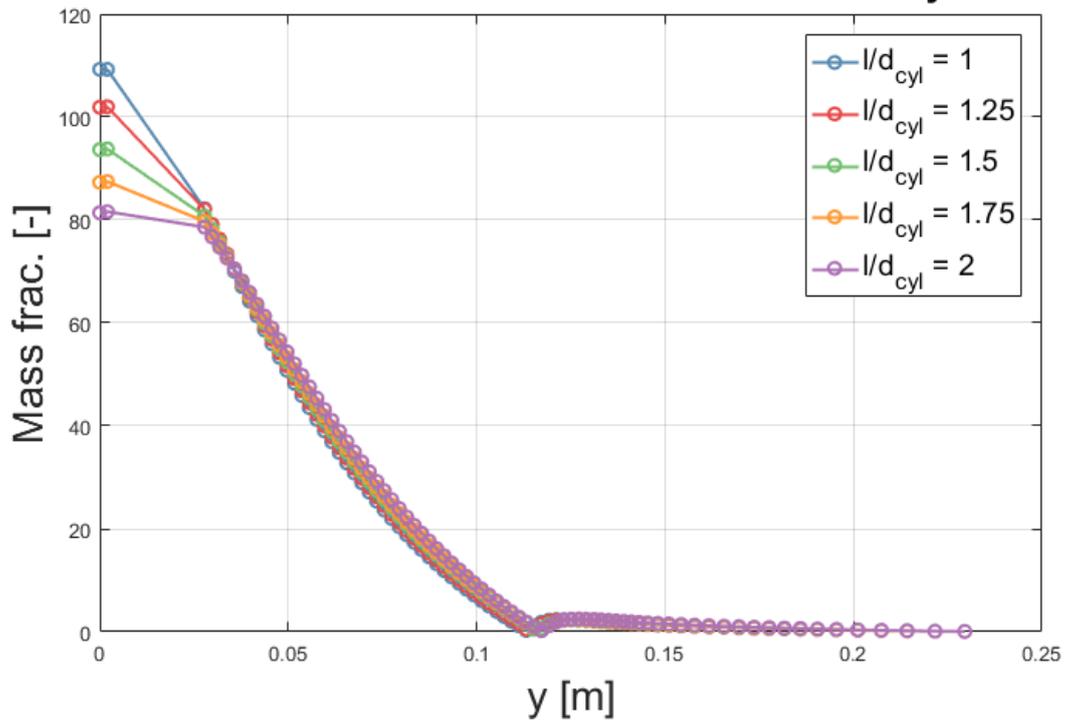


Figura 4.39: Profili spaziali di CH₄ al variare di l/d per d = 12 cm

Profilo della frazione massica di CH₄ con d_{cyl} = 15[cm]

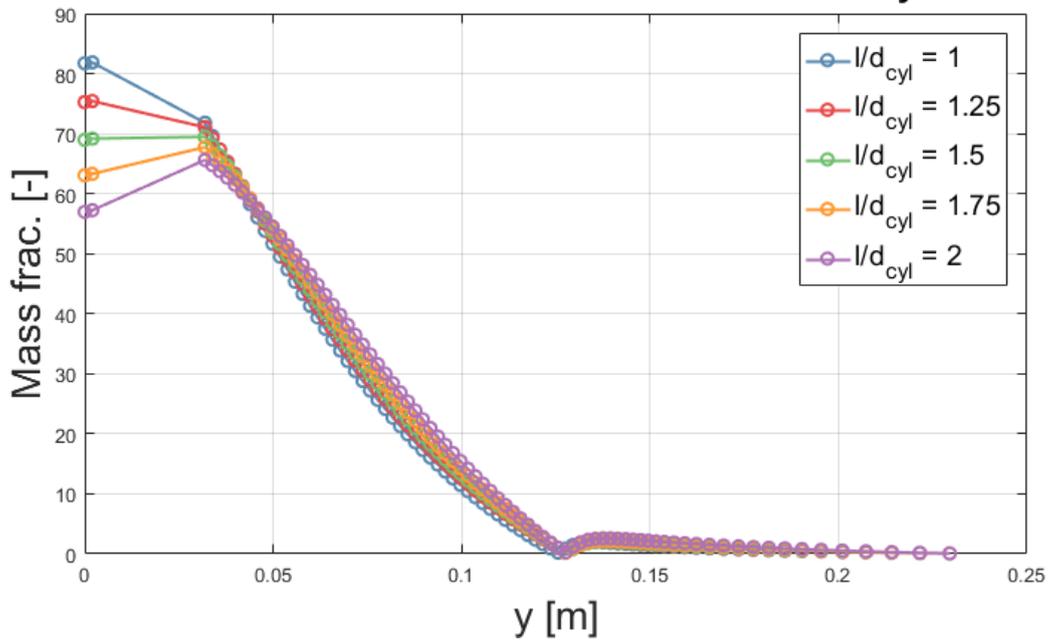


Figura 4.40: Profili spaziali di CH₄ al variare di l/d per d = 15 cm

Profilo della frazione massica di CH₄ con $d_{cyl} = 17[cm]$

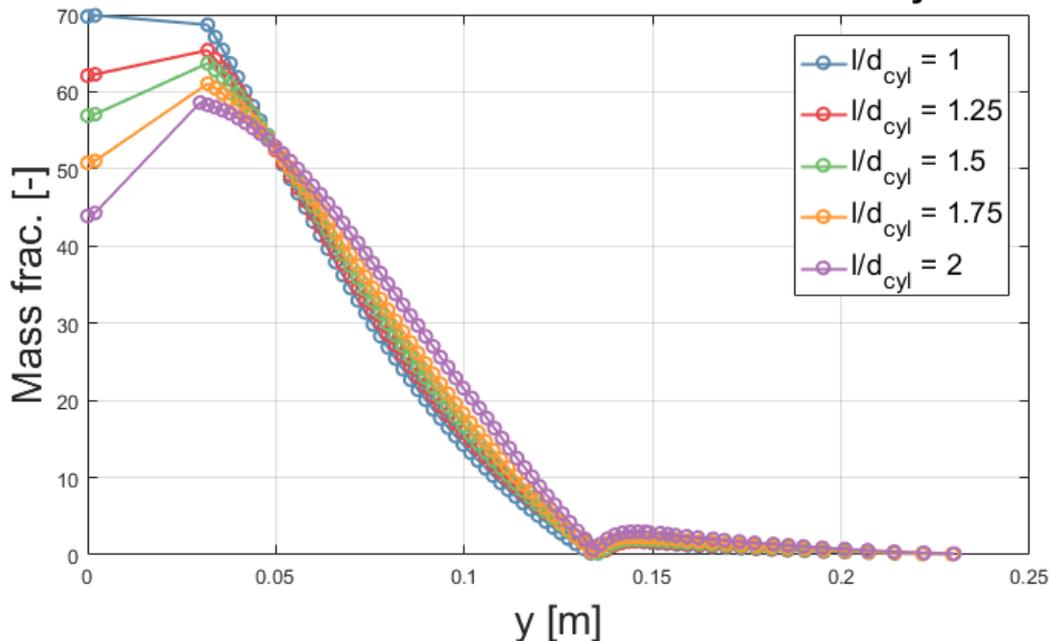


Figura 4.41: Profili spaziali di CH₄ al variare di l/d per $d = 17$ cm

Gli andamenti spaziali di frazione massica di CH₄ sono analoghi a quelli di velocità, in quanto il trasporto di materia è fortemente condizionato dal campo di moto del flusso. Infatti, è possibile vedere come la frazione massica di metano per diametri piccoli abbia un picco per $r \sim 1.25$ in quanto per rapporti più piccoli la il getto non si sviluppa totalmente. Mentre per rapporto più grandi l'ostacolo è abbastanza lontano per permettere al getto di perdere velocità prima di impattare con l'ostacolo.

Per ostacoli con diametri grandi è invece possibile vedere come il picco di frazione massica di metano non sia più corrispondente all'asse del foro ma sia leggermente spostato in quanto il flusso non riesce a richiudersi efficacemente a valle dell'ostacolo.

4.6 Studio al variare delle pressioni di stoccaggio

A questo punto si è deciso di indagare il fenomeno al variare della pressione a cui è stoccata la sostanza in geometria 2D, altro parametro che influenza fortemente il fenomeno.

Si è deciso di adottare i seguenti parametri:

- $d_{foro} = 1$ cm
- $d_{cyl} = 10$ cm
- $l = 15$ cm
- $P_{stoc} = 10 \div 80$ bar
- $L_{SB} = 0.65$ m

La Source Box è stata sovradimensionata con $P = 100$ bar in modo da assicurarsi un dominio necessario per lo sviluppo del flusso di metano in tutti i casi di interesse.

Si sono subito denotate alcune difficoltà a raggiungere la convergenza numerica per pressioni molto alte.

Si è dunque pensato di studiare il fenomeno in funzione del tempo con un modello transitorio. Inizialmente, appurata la consistenza fisica della simulazione stazionario a $P = 10$ bar, si è un

deciso di implementare un modello transitorio alla stessa pressione, per verificare la correttezza delle assunzioni fatte per la simulazione in transitorio.

Nella tabella 4.2 vediamo il confronto tra i due casi:

Tabella 4.2: Risultati a convergenza nei casi di modello stazionario e transitorio

Modello stazionario		Modello transitorio	
Velocità in uscita	Fraz. mass. CH4	Velocità in uscita	Fraz. mass. CH4
[m/s]	[-]	[m/s]	[-]
38.36	0.075	38.34	0.076

Come è possibile osservare, i risultati delle due differenti analisi presentano un margine di scostamento l'uno dell'altro ampiamente accettabile, confermando la coerenza dello studio effettuato con il modello stazionario. Si è allora prospettata come possibilità di studiare il fenomeno con il modello transitorio ma ci si è dovuti scontrare con un costo computazionale troppo elevato per i nostri scopi, dunque si è cercata una soluzione alternativa contattando EnginSoft, fornitore del software ANSYS Fluent. A seguito delle loro indicazioni si è deciso di riprendere lo studio in con il modello stazionario con l'introduzione una rampa lineare di pressione in funzione del numero di iterazioni, per arrivare al valore desiderato di pressione di rilascio in maniera più "rilassata". In questo modo la simulazione calcola una soluzione iniziale per una pressione molto bassa, successivamente questa soluzione viene usata come condizione iniziale per calcolare una nuova soluzione ad una pressione maggiore, sino a giungere alla pressione voluta. Nonostante l'uso della rampa il tempo computazionale per la convergenza numerica della soluzione aumenta notevolmente, infatti si passa da un simulazione a 10 bar che va a convergenza in circa 30 minuti a una simulazione a 80 bar che impiega circa 5 ore.

A questo punto possono essere visualizzati i trend di velocità e frazione massica al crescere della pressione:

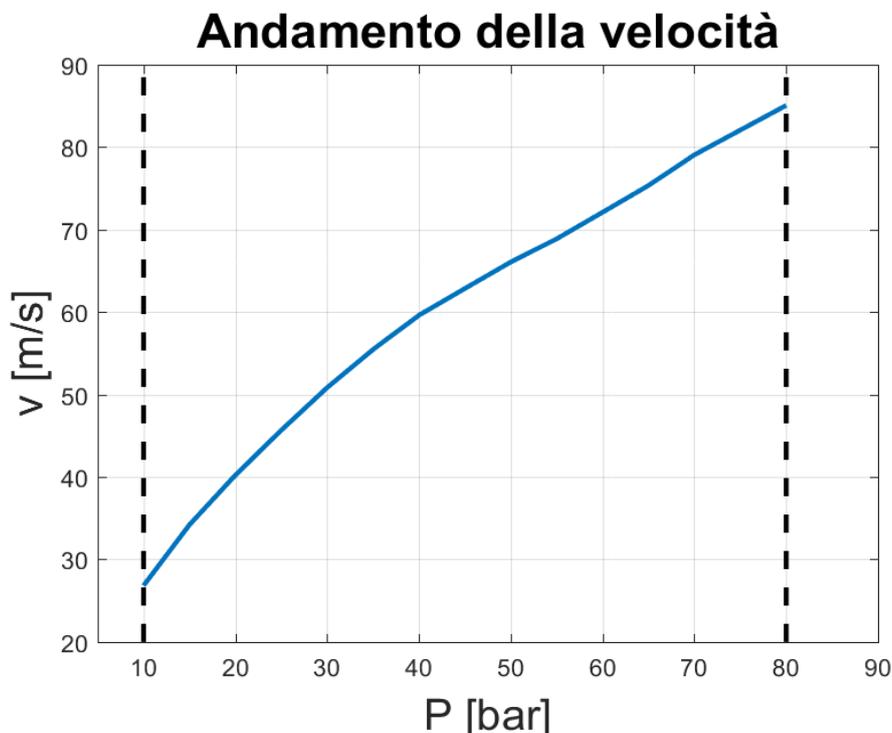


Figura 4.42: Variazione della velocità sulla faccia d'uscita al crescere della P di rilascio

Come è possibile vedere dalla Fig.4.42 la velocità cresce in maniera monotona al crescere della pressione di stoccaggio della sostanza. Questo risultato rispetta il modello teorico di efflusso gassoso da foro in quanto al crescere della pressione di stoccaggio cresce la pressione di sbocco e in maniera proporzionale la temperatura del gas in uscita dal foro. Infine noi sappiamo che la velocità allo sbocco è legata alla temperatura dalla seguente proporzionalità: $v \propto \sqrt{T}$, come è possibile osservare nel paragrafo 2.1.2.

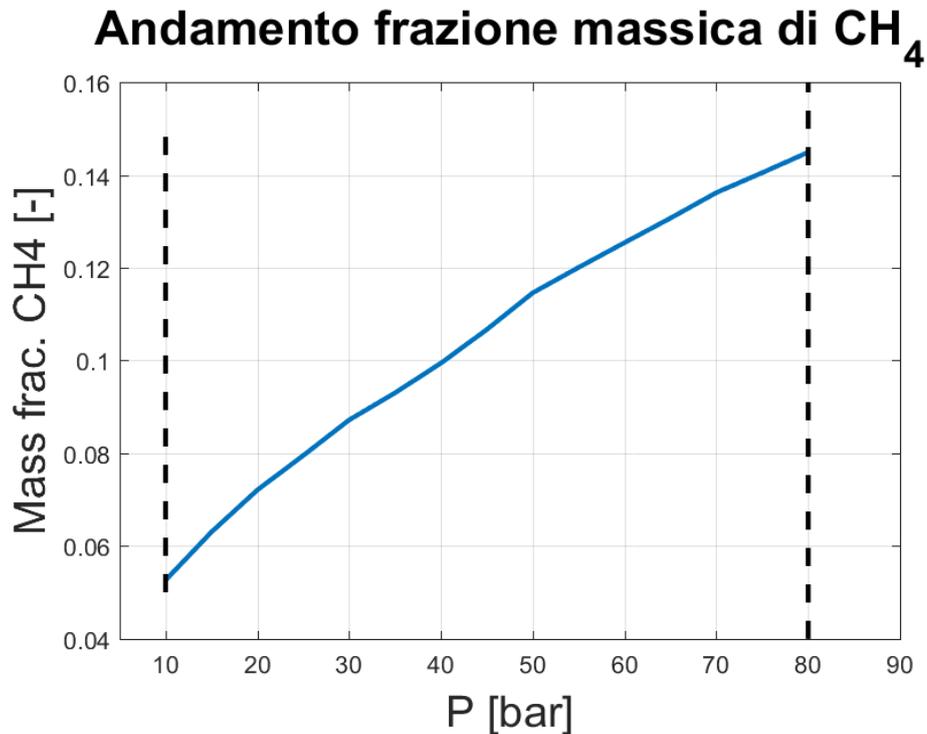


Figura 4.43: Variazione della frazione massica d sulla faccia d'uscita al crescere della P di rilascio

Di conseguenza al crescere della velocità di sbocco della sostanza si ha una crescita del trasporto di materia, che incide sulla crescita della frazione massica di CH₄ in uscita dalla Source Box. Si possono osservare le variazioni del campo di velocità e della frazione massica in 3 diverse configurazioni di pressione di stoccaggio: 15 bar, 50 bar, 80 bar.

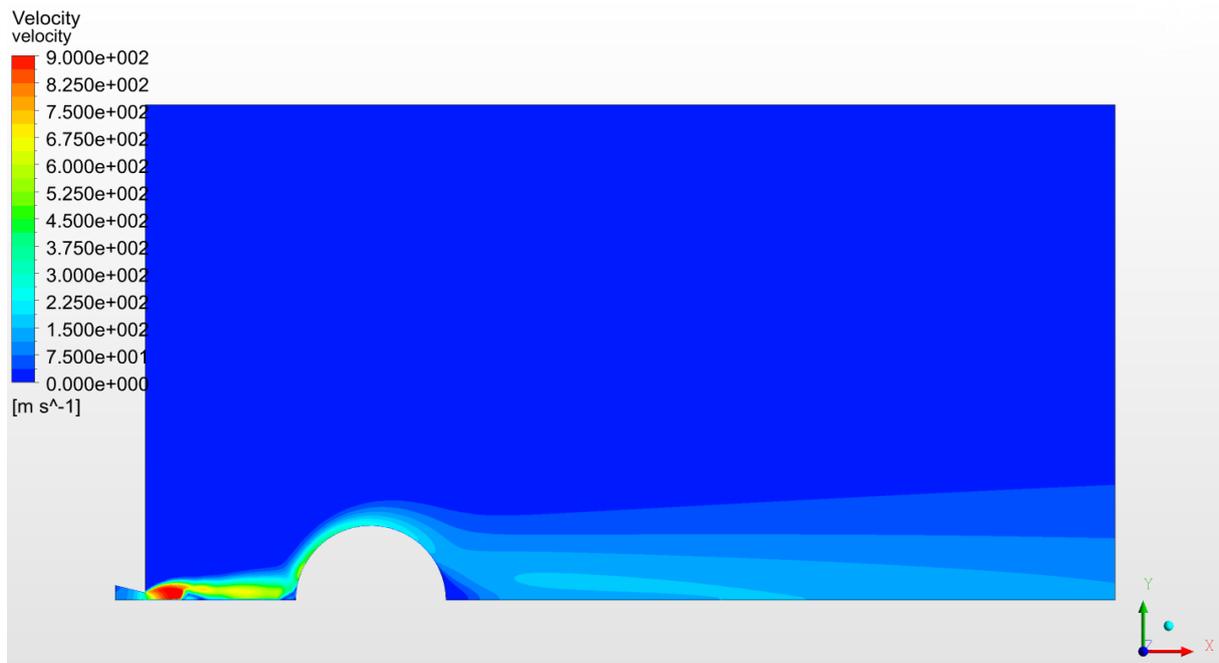


Figura 4.44: Campo di velocità per P = 15 bar

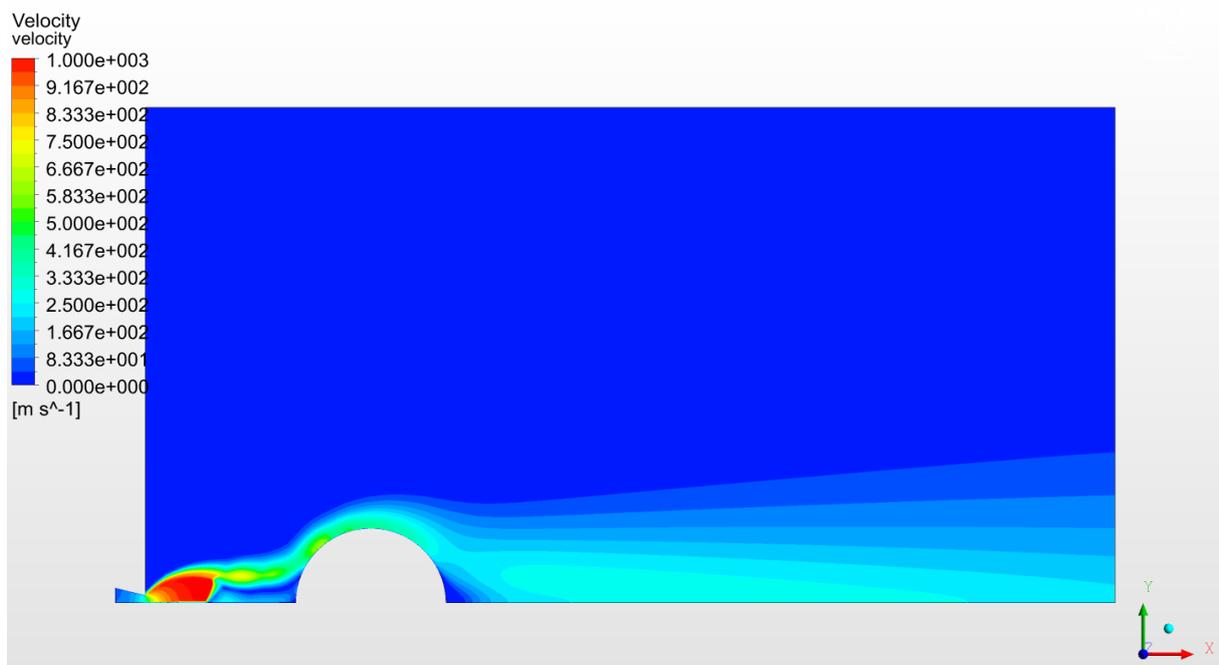


Figura 4.45: Campo di velocità per P = 50 bar

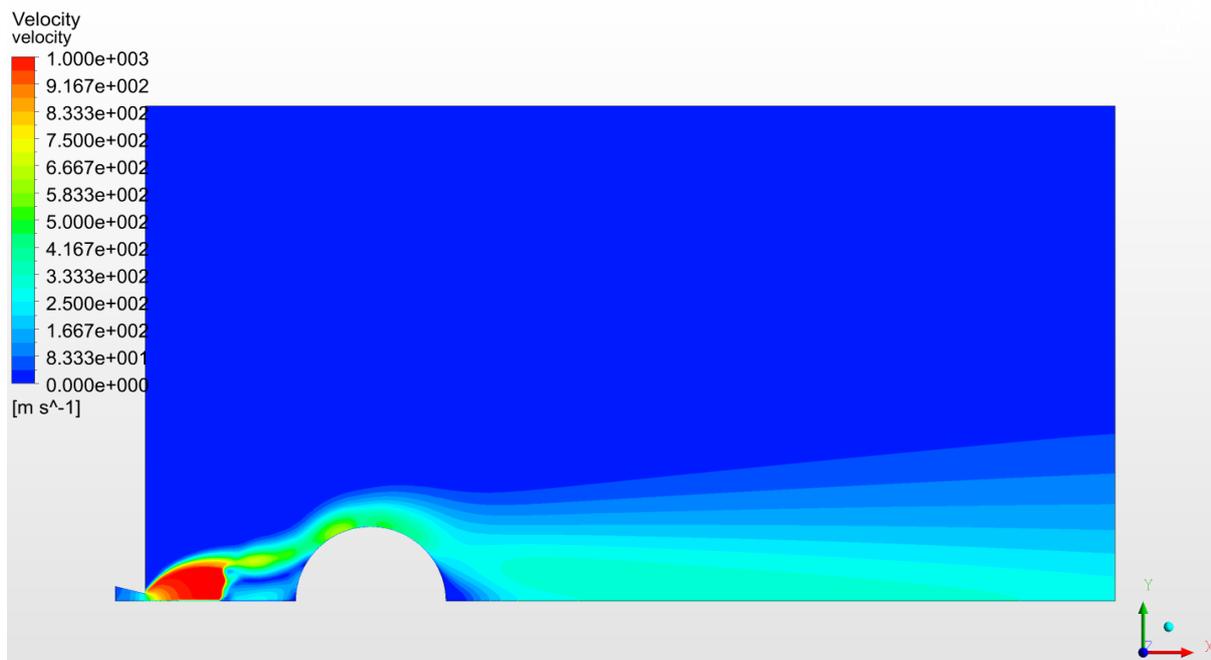


Figura 4.46: Campo di velocità per P = 80 bar

Si può subito apprezzare come all'aumentare della pressione cambi la posizione del disco di Mach come predetto dall'Eq. 2.40. Si può notare come al crescere delle pressione di rilascio cresce anche la dimensione del disco di Mach e di conseguenza l'apertura del getto. Infine è possibile vedere come la regione a valle del cilindro presenti un campo di velocità con valori maggiori al crescere della pressione.

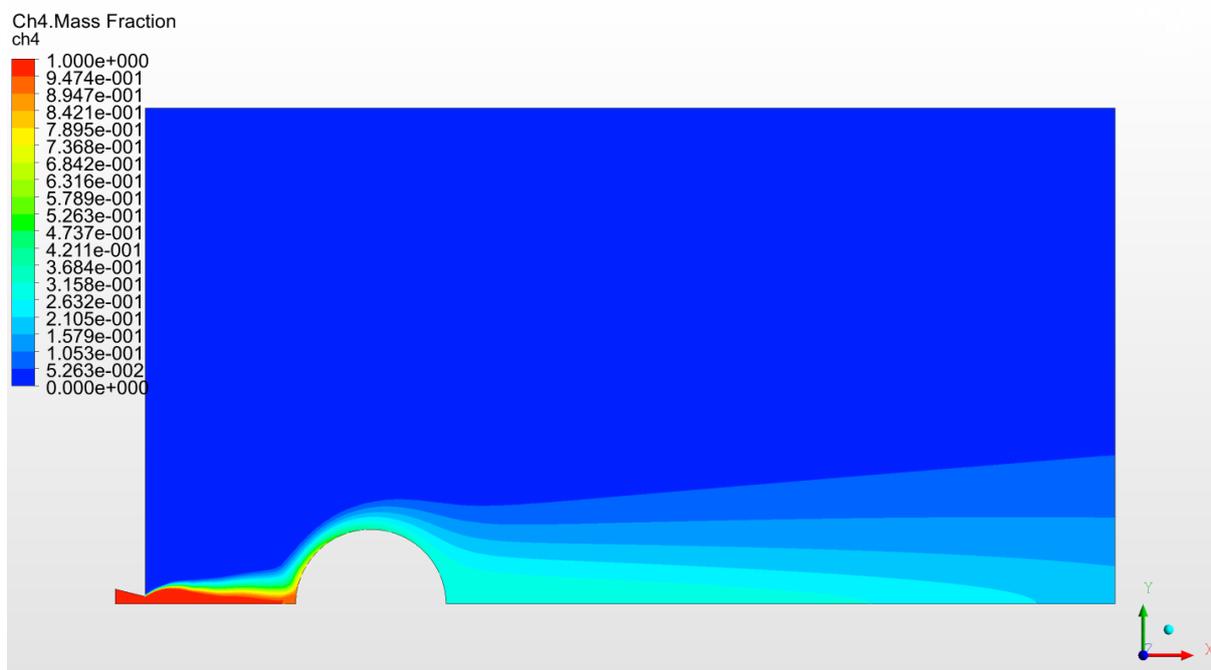


Figura 4.47: Distribuzione della frazione massica di CH₄ per P = 15 bar

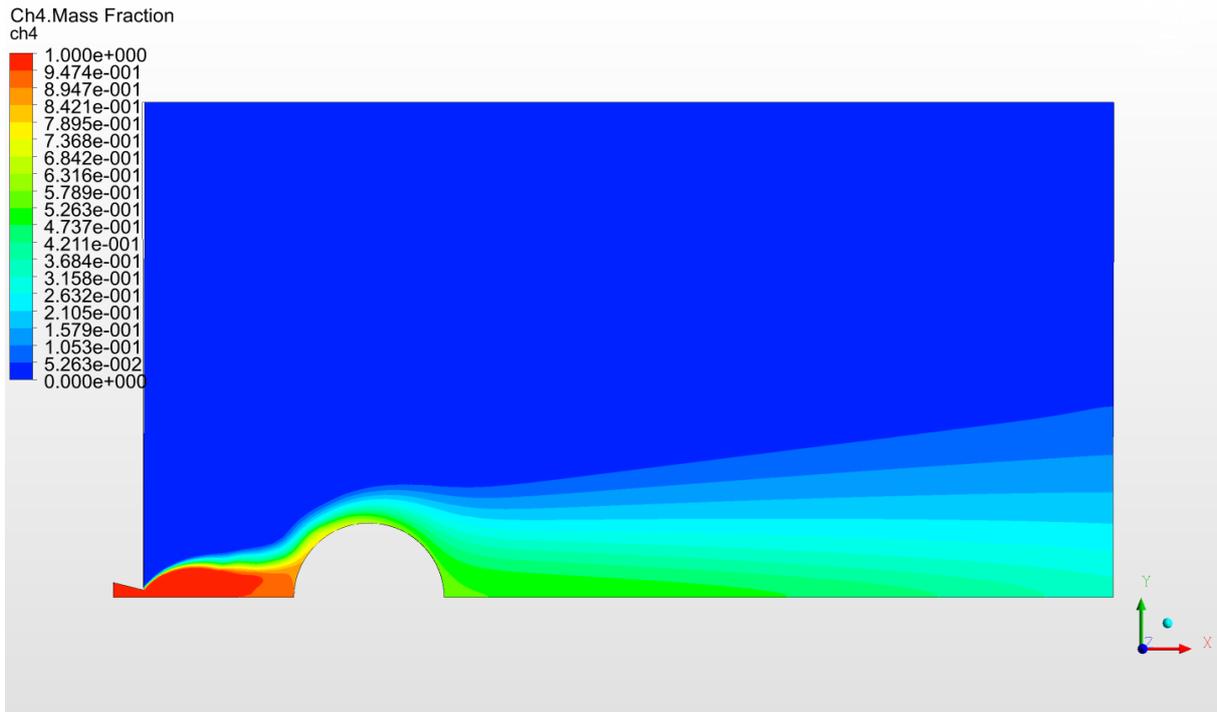


Figura 4.48: Distribuzione della frazione massica di CH₄ per P = 50 bar

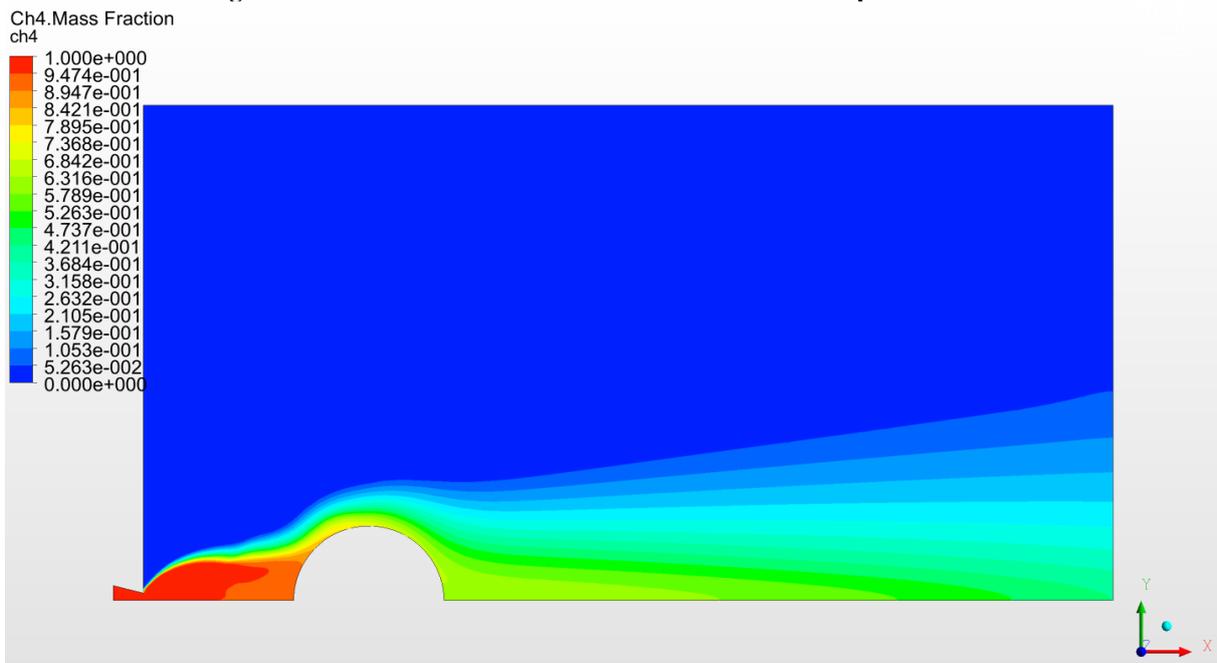


Figura 4.49: Distribuzione della frazione massica di CH₄ per P = 80 bar

Conseguentemente al crescere del disco di Mach anche il getto di metano cresce allo sbocco risentendo di un maggior trasporto dovuto al campo di velocità del flusso. Inoltre, è possibile notare il significativo aumento della frazione massica a valle del cilindro.

Quindi si può affermare che al variare della pressione di rilascio è possibile trovare un trend prevedibile per la velocità e la frazione massica di metano.

5. Conclusioni

Questo lavoro è situato all'interno dell'analisi delle conseguenze dovute ad un rilascio incidentale di una sostanza gassosa ad alte pressioni; il fine di questa analisi è comprendere quali sono le aree coinvolte da danno per realizzare una analisi di rischio in ambito industriale. È stato deciso di modellare questo fenomeno tramite l'analisi CFD, a discapito dei metodi empirici, utilizzando l'innovativo approccio "Two-Steps" che permette di disaccoppiare il fenomeno in due fasi, rilascio e dispersione, in modo da rendere l'analisi di rischio di uno scenario incidentale più veloce e flessibile.

Il focus di questo lavoro è stato realizzare un'analisi di sensitività sui parametri più influenti della prima fase, ovvero quella di rilascio.

La prima parte del lavoro ci ha permesso di comprendere il comportamento fisico di un gas sottoposto ad alte pressioni che viene rilasciato in atmosfera, l'interazione tra getto di gas e altri oggetti ed infine il dominio adatto su cui studiare la fase di rilascio.

Successivamente sono stati individuati i parametri all'interno del dominio che possono influenzare il fenomeno e sono stati utili a condurre l'analisi di sensitività. Si è dato vita ad un'implementazione su un dominio bidimensionale per un'analisi preliminare e ad una successiva analisi tridimensionale tramite il software di calcolo ANSYS Fluent.

Infine sono stati mostrati gli studi parametrici svolti e i risultati raggiunti. Si è definita l'influenza dei diversi parametri sul fenomeno di rilascio e si è cercata una relazione tra essi e le grandezze di interesse in uscita dalla Source Box, come preannunciato negli obiettivi del lavoro. Un primo importante risultato è stato evidenziato trovando una correlazione tra ostacoli di diametro diverso e le grandezze in uscita dalla Source Box. Un secondo notevole risultato è stato raggiunto vedendo come sia possibile slegare l'analisi della Source Box da una grandezza geometrica, ovvero la distanza tra foro e ostacolo. Infatti, grazie all'analisi svolta è possibile dire che questa grandezza è ininfluenta. Per ogni diametro sarà possibile studiare una sola simulazione al posto di più simulazioni con l'ostacolo a diversa distanza. Questo risultato che ci permette di ridurre il numero di Source Box da studiare in maniera considerevole.

Successivamente è stato accennato lo studio dell'evolversi dei profili spaziali, input di interesse per il secondo stadio dell'approccio adottato, la fase di dispersione. Questo sarà necessariamente uno sviluppo futuro del lavoro che potrebbe permettere di ridurre in maniera considerevole il numero di casi da studiare.

In conclusione è stato studiato il comportamento della Source Box al variare della pressione. Questo studio è stato il più complesso dal punto di vista computazionale in quanto si è rilevata la difficoltà di modellizzare alti gradienti di pressione. Sono state trovate più strade per superare queste difficoltà, prima con l'introduzione di un modello transitorio, poi con l'utilizzo di una rampa di pressione che portasse la simulazione in maniera graduale alla pressione di rilascio desiderata. Quest'ultima è la soluzione che è stata scelta per superare questa difficoltà, in quanto rappresentava quella con il costo computazionale minore. Anche l'analisi su questo parametro ci ha permesso di verificare la presenza di una correlazione netta tra i parametri di input e di output della Source box.

Tra gli sviluppi futuri si suggerisce il proseguo dello studio parametrico per indagare i parametri significativi rimanenti, come il diametro del foro, l'eccentricità del getto e la direzionalità del getto. Fondamentale è poi lo studio dei profili in geometria 3D, in quanto questi sono dati di input per la dispersione, seconda fase dell'analisi delle aree di danno. La possibilità di trovare profili simili al variare dei parametri caratteristici del fenomeno di rilascio potrebbe far diminuire drasticamente la quantità di casi da studiare per creare una libreria esaustiva di Source Box.

Uno sviluppo futuro importante per la diffusione del metodo CDF “Two steps” è sicuramente quello di indagare altre applicazioni industriali in cui questo sia applicabile, non limitando il suo utilizzo all’ambiente Oil & Gas.

Inoltre, potrebbe essere di particolare interesse studiare i fenomeni termomeccanici che si sviluppano sull’ostacolo e dare vita ad uno studio di interazione fluido-struttura (FSI).

Altro sviluppo futuro imprescindibile sarà la validazione sperimentale dei modelli computazionali sviluppati all’interno di questa tesi in modo da stabilire l’efficacia del paradigma proposto, lavoro che sarà possibile a valle della costruzione di un laboratorio sperimentale in fase di realizzazione.

Bibliografia

- [1] Istat (2018). *L'economia europea dall'inizio del millennio UN RITRATTO STATISTICO*. Tratto da www.istat.it: <https://www.istat.it/economia-europea-millennio/index.html?lang=it>
- [2] eurosta (2018). Tratto da <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database>
- [3] Treccani (2019). Tratto da [treccani.it](http://www.treccani.it): <http://www.treccani.it/enciclopedia/industria/>
- [4] Istat (2017). Tratto da www.istat.it: <https://www.istat.it/economia-europea-millennio/bloc-3a.html?lang=it>
- [5] statista (2019). *Market value of industrial gases worldwide in 2017 and 2023 (in billion U.S. dollars)*. Tratto da [statista.com](http://www.statista.com): <https://www.statista.com/statistics/928985/global-industrial-gases-market-value/>
- [6] CCOHS (2008). Tratto da <https://www.ccohs.ca/>: <https://www.ccohs.ca/oshanswers/chemicals/cryogenic/cryogen1.html>
- [7] Il Post (2016). *Il disastro di Seveso*. Tratto da <https://www.ilpost.it/>: <https://www.ilpost.it/2016/07/10/il-disastro-di-seveso/>
- [8] Gazzetta Ufficiale della Repubblica italiana (2015). *DECRETO LEGISLATIVO 26 giugno 2015, n. 105*. Tratto da www.gazzettaufficiale.it: <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2015/07/14/15G00121/sg>
- [9] (2013). Tratto da eur-lex.europa.eu: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/it/TXT/?uri=CELEX:32013L0030>
- [10] The Guardian (2018). *Deepwater Horizon disaster altered building blocks of ocean life*. Tratto da theguardian.com: <https://www.theguardian.com/environment/2018/jun/28/bp-deepwater-horizon-oil-spill-report>
- [11] PoliTOcomunica (2018). Tratto da www.politocomunica.polito.it: <http://www.politocomunica.polito.it/content/download/5192/33194/file/Comunicato%20stampa%20-%20Accordo%20DGS%20UNMIG%20e%20POLITO.pdf>
- [12] A. Carpignano (2017). *Slide del modulo di Safeti and Risk Analysis*.
- [13] B. R. Munson et al. (2012). *Fundamentals of Fluid Mechanics, 7th Edition*. Wiley.

- [14] J. D. Anderson (2003). *Modern compressible flow: With historical perspective*. Boston: McGraw-Hill.
- [15] P. G. Franquet (2015). Review on the underexpanded jets.
- [16] G. N. Abramovich (1963). *The Theory of Turbulent Jets*. M.I.T. Press.
- [17] R. G. Wilmoth et al. (1987). *Multiscale Turbulence Effects in Supersonic Jets Exhausting into Still Air*. NASA Technical Paper.
- [18] C. Donaldson et al. (1971). A study of free jet impingement. Part 1. Mean properties of free and impinging jets. *Journal of Fluid Mechanics*, 45(2), 281-319.
- [19] A. C. Uggenti (2019). Hydrogen leakages in a congested aircraft environment: a CFD simulation method. *Easn 2019*. Atene.
- [20] N. Dam et al. (1998). Imaging of an Underexpanded Nozzle Flow by UV Laser Rayleigh Scattering. *Experiments in Fluids* 24(2), 93-101.
- [21] V. Zapryagaev (2015). Gasdynamic Structure of an Axisymmetric Supersonic Underexpanded Jet. *Fluid Dyn*, 50 - 87.
- [22] C. Rupolo (2018). Modellizzazione CFD del rilascio di gas compressi in ambiente off-shore: source boxes. Politecnico di Torino.
- [23] D. P. Nolan (2011). *Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles for Oil, Gas, Chemical and Related Facilities*. Gulf Professional Publishing.
- [24] S. Guasco (2015). Towards the CFD simulation of accidents on off-shore platforms: dispersion of a turbulent jet hitting a flat plate. Politecnico di Torino.
- [25] E. Pederiva (2015). Towards the CFD simulation of accidents on off-shore platforms: dispersion of a turbulent jet hitting a cylinder. Politecnico di Torino.
- [26] T. Corti (2016). CFD modelling of accidental events in Oil&gas environment: definition of a source box. Politecnico di Torino.
- [27] E. Carrozza (2018). Modellazione CFD per lo studio di rilasci e dispersione atmosferica di inquinanti in piattaforme Oil&Gas. Politecnico di Torino.
- [28] A. Moscatello (2018). Modellazione CFD di rilasci incidentali di gas infiammabili e tossici in piattaforme Oil&Gas. Politecnico di Torino.
- [29] J. Choin et al. (2012). A CFD simulation of hydrogen dispersion for the hydrogen leakage from a fuel cell vehicle in an underground parking garage. *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 38, Issue 19, 8084-8091.
- [30] H. Wilkening et al. (2007). CFD modelling of accidental hydrogen release from pipelines. *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 32, Issue 13, 2206-2215.

- [31] S. Crist et al. (1966). Study of the highly underexpanded sonic jet. *AIAA Journal*, Volume 4, No.1, pp 68-71.
- [32] A. C. Ugenti et al. (2016). Perspective and criticalities of CFD modelling for the analysis of Oil and gas offshore accident scenarios. *ESREL 2016*, (p. 195 - 201). Glasgow.
- [33] OGP 434-1.
- [35] G. Sobrero (2017). Dispense corso Localizzazione e Impatto Ambientale dei Sistemi Energetici. Politecnico di Torino.
- [36] J. Ferziger et al. (2002). *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer-Verlag.
- [37] J. Castillo (1991). *Mathematical aspects of numerical grid generation*. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics.
- [38] ANSYS Inc. ANSYS Fluent User's Guide.
- [39] F. R. Menter (1994). Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *AIAA Journal*, vol. 32, no 8., pp. 1598-1605.
- [40] D. C. Wilcox (1988). Re-assessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models. *AIAA Journal*, vol. 26, no. 11, pp. 1299-1310.
- [41] H. K. Versteeg et al.(2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Prentice Hall.
- [42] P. Birkby et al. (2001). Numerical predictions of turbulent underexpanded sonic jets using a pressure-based methodology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part G: Journal of Aerospace*, Vol. 215, Issue 3 , pp. 165-173.
- [43] M. Marklund (2006). Pressurized Entrained-flow High Temperature Black Liquor Gasification CFD Based Reactor Scale-up Method and Spray Burner Characterization. Luleå University of Technology.
- [44] T. Jiyan et al. (2018). *Computational Fluid Dynamics (Third Edition), Chapter 4: CFD Mesh Generation: A Practical Guideline*. Butterworth-Heinemann.