

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale



Tesi di Laurea Specialistica

**Fenomeno di *entrainment* nella propulsione ibrida:
Studio della variazione del diametro delle goccioline**

**Autore: Pedro Henrique Fauza Sadocco
Matr. 748819**

Relatore: Prof. Luciano Galfetti

Anno Accademico 2010/2011

Sommario

L'uso limitato della propulsione ibrida nel settore aerospaziale, anche considerando i grandi vantaggi che questo tipo di propulsione presenta, è dovuto alla bassa velocità di regressione della superficie del grano di combustibile solido ottenuta in motori di questo tipo. Uno dei metodi scoperti per aumentare questa velocità di regressione è l'uso di combustibili solidi che danno luogo al fenomeno di *entrainment*, anche conosciuto come trascinamento di goccioline. Il diametro di queste goccioline ha una grande influenza nell'aumento della velocità di regressione della superficie del grano di combustibile solido dovuto a questo fenomeno, il che giustifica l'obiettivo di questa tesi di analizzare gli effetti della viscosità del combustibile, dello spessore dello strato liquido di combustibile, della velocità del flusso gassoso di ossidante e del profilo di velocità del flusso gassoso di ossidante sul diametro delle goccioline formate. I dati necessari per fare questa analisi sono stati ottenuti via simulazioni del fenomeno di *entrainment* fatte con un codice sviluppato in questa tesi sulla piattaforma del programma *Gerris Flow Solver*. Come risultato di questa analisi è stato osservato che il diametro delle goccioline: tende a diminuire con l'aumento della viscosità del combustibile e della velocità del flusso gassoso di ossidante, tende a aumentare con l'aumento dello spessore dello strato liquido di combustibile, e cambia per diversi profili di velocità del flusso gassoso di ossidante. I risultati ottenuti potranno essere utilmente impiegati come condizioni al contorno nell'ambito di codici numerici di simulazione dei processi combustione negli endoreattori ibridi.

Parole chiave: *Entrainment*; Propulsione Ibrida; Goccioline; *Gerris Flow Solver*.

Abstract

The low use of hybrid propulsion in the aerospace industry, even considering the great advantages this type of propulsion presents, is due to the low surface regression rate of the solid fuel found in this kind of thrusters. One of the methods discovered to increase this regression rate is the use of solid fuels that give rise to droplet entrainment. The diameter of the droplets has a great influence on the increase of the surface regression rate of the solid fuel caused by the droplet entrainment, therefore justifying the objective of this project, which is the analysis of the effects of the fuel viscosity, thickness of the liquid layer of the fuel, velocity of the oxidizer gas flow, and velocity profile of the oxidizer gas flow on the diameter of the droplets. The necessary data for the analysis were obtained from simulations of the droplet entrainment made with a code developed in this project for the software *Gerris Flow Solver*. As a result of this analysis, it was observed that the diameter of the droplets: tends to decrease with the increase of the viscosity of the fuel and velocity of the oxidizer gas flow, tends to increase with the increase of the thickness of the liquid layer of the fuel, and varies for different velocity profiles of the oxidizer gas flow. The results obtained can be used as a suitable database for numerical codes focused on modeling the combustion processes in the combustion chambers of hybrid rocket engines.

Keywords: *Entrainment*; Hybrid Propulsion; Droplets; *Gerris Flow Solver*.

Indice

Elenco delle figure
Elenco delle tabelle

1. Introduzione	1
1.1 Inquadramento della tesi.....	1
1.1.1 Fondamenti di propulsione ibrida.....	1
1.1.2 La fenomenologia dell' <i>entrainment</i>	4
1.2 Obiettivi della tesi.....	5
2. Stato dell'arte	7
2.1 Contenuto essenziale dell'articolo <i>Combustion of Liquefying Hybrid Propellants: Part 1, General Theory</i> di M. A. Karabeyoglu, D. Altman, e B. J. Cantwell [3].....	7
2.2 Contenuto essenziale dell'articolo <i>Combustion of Liquefying Hybrid Propellants: Part 2, Stability of Liquid Films</i> di M. A. Karabeyoglu e B. J. Cantwell [4].....	10
3. Impianto metodologico della tesi	15
3.1 Simulazione del fenomeno di <i>entrainment</i> con il programma <i>Gerris Flow Solver</i>	15
3.1.1 Descrizione del programma <i>Gerris Flow Solver</i>	16
3.1.2 Modellazione della geometria.....	17
3.1.3 Definizione delle condizioni iniziali.....	19
3.1.4 Definizione delle condizioni al contorno.....	19
3.1.5 Definizione delle proprietà fisiche.....	20
3.1.6 Definizione dei parametri di controllo.....	20
3.1.7 Presentazione dei risultati.....	21
3.2 Misura dei diametri delle goccioline con il programma <i>ImageJ</i>	23
4. Analisi ed interpretazione dei risultati ottenuti	25
4.1 Descrizione delle prove condotte.....	25
4.2 Descrizione dell'analisi statistica.....	26
4.3 Effetto della viscosità del combustibile.....	27
4.4 Effetto dello spessore dello strato liquido di combustibile.....	29
4.5 Effetto della velocità del flusso gassoso di ossidante.....	31
4.6 Effetto del profilo di velocità del flusso gassoso di ossidante...	34

5. Conclusioni e sviluppi futuri.....	37
Appendice A.....	39
Appendice B.....	45
Riferimenti.....	53

Elenco delle figure

Figura 1.1: Configurazione classica di un motore a propulsione ibrida.....	1
Figura 1.2: Schematizzazione della combustione nella propulsione ibrida tradizionale (tratta da [1]).....	3
Figura 1.3: Il fenomeno di <i>entrainment</i> (tratta da [2]).....	5
Figura 2.1: Velocità di regressione della superficie del grano di combustibile solido ottenute per diversi combustibili solidi (tratta da [3]).....	8
Figura 2.2: Modello termico utilizzato per lo sviluppo dell'espressione dello spessore dello strato liquido (tratta da [3]).....	9
Figura 2.3: Condizioni critiche per l'occorrenza del fenomeno di <i>entrainment</i> per ogni combustibile solido (tratta da [3]).....	9
Figura 2.4: Modello di stabilità studiato (tratta da [4]).....	11
Figura 2.5: Effetto del numero di Reynolds del flusso gassoso nel tasso di amplificazione delle instabilizzazioni (tratta da [4]).....	12
Figura 2.6: Effetto della velocità di regressione della superficie del grano di combustibile solido nel tasso di amplificazione delle instabilizzazioni (b è il parametro di velocità di regressione) (tratta da [4]).....	13
Figura 2.7: Effetto del combustibile solido nel tasso di amplificazione delle instabilizzazioni (tratta da [4]).....	13
Figura 3.1: Descrizione della sequenza logica utilizzata nello sviluppo del codice per simulare il fenomeno di <i>entrainment</i> con il programma <i>Gerris Flow Solver</i>	16
Figura 3.2: Logo del programma <i>Gerris Flow Solver</i> (tratto da [5]).....	17
Figura 3.3: Geometria creata per rappresentare bidimensionalmente la camera di combustione di un motore ibrido.....	18
Figura 3.4: Immagine del fenomeno di <i>entrainment</i> ottenuta con la simulazione del codice sviluppato per il programma <i>Gerris Flow Solver</i> ...	22
Figura 3.5: Ingrandimento dell'area evidenziata nella figura 3.4.....	22
Figura 3.6: Immagine della misurazione del diametro di una gocciolina con il programma <i>ImageJ</i>	23
Figura 4.1: Rappresentazione grafica dei diametri medi e degli intervalli di confidenza dei casi utilizzati nell'analisi dell'effetto della viscosità del combustibile.....	28
Figura 4.2: Rappresentazione grafica dei diametri medi e degli intervalli di confidenza dei casi utilizzati nell'analisi dell'effetto dello spessore dello strato liquido di combustibile.....	31
Figura 4.3: Rappresentazione grafica dei diametri medi e degli intervalli di confidenza dei casi utilizzati nell'analisi dell'effetto della velocità del flusso gassoso di ossidante.....	33

Figura 4.4: Rappresentazione grafica dei diametri medi e degli intervalli di confidenza dei casi utilizzati nell'analisi dell'effetto del profilo di velocità del flusso gassoso di ossidante.....	36
Figura B.1: Istogramma dei diametri delle goccioline del caso standard....	45
Figura B.2: Istogramma dei diametri delle goccioline del caso V1.....	46
Figura B.3: Istogramma dei diametri delle goccioline del caso V2.....	46
Figura B.4: Istogramma dei diametri delle goccioline del caso V3.....	47
Figura B.5: Istogramma dei diametri delle goccioline del caso V4.....	47
Figura B.6: Istogramma dei diametri delle goccioline del caso H1.....	48
Figura B.7: Istogramma dei diametri delle goccioline del caso H2.....	48
Figura B.8: Istogramma dei diametri delle goccioline del caso H3.....	49
Figura B.9: Istogramma dei diametri delle goccioline del caso H4.....	49
Figura B.10: Istogramma dei diametri delle goccioline del caso U1.....	50
Figura B.11: Istogramma dei diametri delle goccioline del caso U2.....	50
Figura B.12: Istogramma dei diametri delle goccioline del caso U3.....	51
Figura B.13: Istogramma dei diametri delle goccioline del caso U4.....	51
Figura B.14: Istogramma dei diametri delle goccioline del caso L.....	52
Figura B.15: Istogramma dei diametri delle goccioline del caso DR.....	52

Elenco delle tabelle

Tabella 3.1: Proprietà fisiche dell'aria e della paraffina.....	20
Tabella 4.1: Valori dei parametri utilizzati in ciascuna prova.....	26
Tabella 4.2: Valori dei diametri medi e degli intervalli di confidenza dei casi utilizzati nell'analisi dell'effetto della viscosità del combustibile.....	28
Tabella 4.3: Valori dei diametri medi e degli intervalli di confidenza dei casi utilizzati nell'analisi dell'effetto dello spessore dello strato liquido di combustibile.....	30
Tabella 4.4: Valori dei diametri medi e degli intervalli di confidenza dei casi utilizzati nell'analisi dell'effetto della velocità del flusso gassoso di ossidante.....	32
Tabella 4.5: Valori dei diametri medi e degli intervalli di confidenza dei casi utilizzati nell'analisi dell'effetto del profilo di velocità del flusso gassoso di ossidante.....	35

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Inquadramento della tesi

1.1.1 Fondamenti di propulsione ibrida

La propulsione ibrida si basa nell'utilizzo di uno dei reagenti della combustione nello stato solido e l'altro nello stato liquido o gassoso. Questo tipo di propulsione è chiamato "ibrido" perché utilizza i reagenti della combustione in stati diversi. Nella configurazione classica di un motore ibrido, rappresentata in figura 1.1, si utilizza il combustibile nello stato solido e l'ossidante nello stato liquido o gassoso, mentre nella configurazione inversa si utilizza l'ossidante nello stato solido e il combustibile nello stato liquido o gassoso.

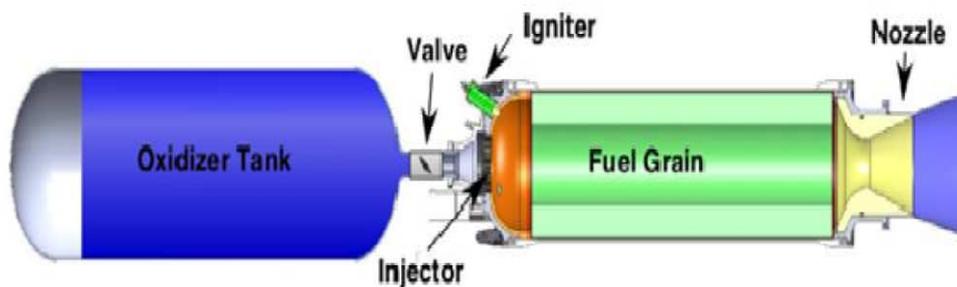


Figura 1.1: Configurazione classica di un motore a propulsione ibrida

Nella configurazione classica un motore a propulsione ibrida è costituito dai seguenti componenti principali:

- Serbatoio di ossidante: utilizzato per immagazzinare l'ossidante pressurizzato nello stato liquido o gassoso.
- Valvola di iniezione: utilizzata per controllare e regolare l'iniezione di ossidante nella camera di combustione.
- Camera di combustione: utilizzata per immagazzinare il grano combustibile ed effettuare la combustione.

- Ugello: utilizzato per generare la spinta tramite l'accelerazione dei gas prodotti dalla combustione.

La propulsione ibrida presenta i seguenti vantaggi che la rendono di grande interesse nel settore aerospaziale:

- Sicurezza: i reagenti sono inerti se questi non sono insieme. Per questo non c'è il rischio di accensioni accidentali e, in caso di emergenza, per spegnere il motore basta interrompere l'iniezione di ossidante.
- Flessibilità di funzionamento: la quantità di ossidante iniettato è controllata dalla valvola di iniezione. Per questo si può controllare la quantità di spinta generata e si possono fare accensioni e spegnimenti multipli.
- Affidabilità di funzionamento: è di semplice costruzione, ha ridotta sensibilità termica, e tollera difetti di manifattura del grano combustibile.
- Versatilità nella scelta dei reagenti: i requisiti meccanici del reagente solido sono poco esigenti.
- Costi bassi: la costruzione è semplice (affidabilità di funzionamento) e si possono utilizzare reagenti economici (versatilità nella scelta dei reagenti).
- Basso impatto ambientale: si possono utilizzare reagenti la cui combustione causa un basso impatto ambientale (versatilità nella scelta dei reagenti).
- Buone prestazioni propulsive: si può utilizzare una coppia di reagenti che offra alte prestazioni propulsive (versatilità nella scelta dei reagenti).

Il grande interesse del settore aerospaziale nella propulsione ibrida è dovuto al fatto che questa unisce i principali vantaggi delle già consolidate propulsioni liquida (sicurezza e flessibilità di funzionamento) e solida (costi bassi). Però, nonostante questi grandi vantaggi, la propulsione ibrida presenta i seguenti svantaggi che limitano il suo utilizzo nel settore aerospaziale:

- Velocità di regressione della superficie del grano di combustibile solido bassa e poco sensibile alle condizioni operative.
- Difficoltà di operare in motori di grande scala.
- Bassa qualità di combustione (ruvida e poco efficiente).
- Possibilità di instabilizzazioni longitudinali durante il funzionamento del motore.
- Variazione del rapporto di miscela lungo il tempo durante il funzionamento del motore.

Nella propulsione ibrida tradizionale la combustione avviene tra l'ossidante gassoso e il combustibile vaporizzato, come è stato rappresentato in figura 1.2. La condizione limitante nella propulsione ibrida è la bassa velocità di regressione della superficie del grano di combustibile solido. Questa è il tasso con cui il combustibile solido è consumato nella direzione normale alla superficie solida; in altre parole, è la velocità con cui il combustibile vaporizzato è creato. Pertanto nella propulsione ibrida la portata massica di combustibile vaporizzato è bassa.

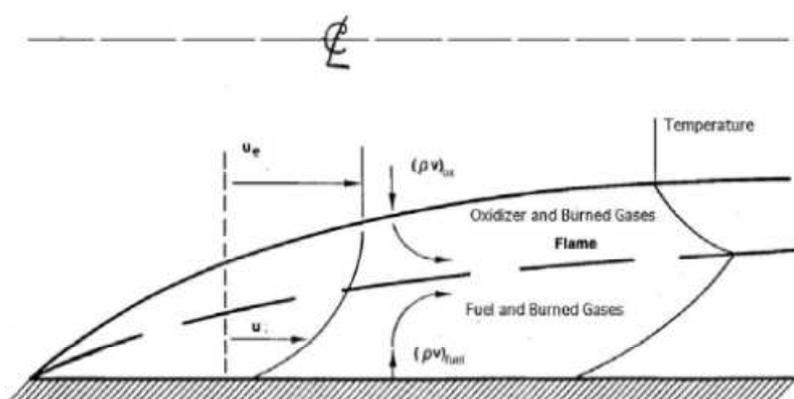


Figura 1.2: Schematizzazione della combustione nella propulsione ibrida tradizionale (tratta da [1])

Inoltre la portata massica di ossidante iniettato nella camera di combustione è controllata in modo da avere il rapporto di miscela desiderato. Dunque la portata massica di ossidante è direttamente legata alla portata massica di combustibile vaporizzato e, quindi, anche la portata massica di ossidante è bassa. Di conseguenza la portata massica dei gas prodotti dalla combustione è bassa perché è direttamente legata alla somma delle portate massiche di combustibile vaporizzato e di ossidante iniettato.

La spinta generata nella propulsione ibrida è direttamente proporzionale alla portata massica che passa nell'ugello. Questa corrisponde alla portata massica dei gas prodotti dalla combustione e, per questo, la spinta generata è bassa. Questo fatto è la ragione per cui non è possibile utilizzare motori di tipo ibrido per i lanciatori pesanti perché la condizione necessaria di un propulsore per questa applicazione è generare una quantità di spinta superiore al peso del lanciatore.

Un importante tema di ricerca attualmente è l'aumento della velocità di regressione della superficie del grano di combustibile solido nella propulsione ibrida a causa dei grandi vantaggi che questo tipo di propulsione presenta. In

questa maniera motori di tipo ibrido potranno essere utilizzati, in futuro, per lanciatori pesanti, che rappresentano la principale applicazione propulsiva nel settore aerospaziale.

1.1.2 La fenomenologia dell'*entrainment*

Il fenomeno di *entrainment* è una delle tecniche scoperte per aumentare la velocità di regressione della superficie del grano di combustibile solido nella propulsione ibrida. Con questa tecnica si può aumentare di un ordine di grandezza la velocità di regressione in un motore di tipo ibrido.

Il termine "*entrainment*" significa, in inglese, trascinamento di goccioline a un gas a seguito di una instabilizzazione di uno strato liquido. Questa tecnica è così definita perché è stato scoperto che il trascinamento di goccioline di combustibile nel flusso di ossidante gassoso aumenta la velocità di regressione della superficie del grano di combustibile solido nella propulsione ibrida.

Il fenomeno di *entrainment* avviene quando c'è una instabilizzazione dello strato liquido creato sulla superficie solida del grano di combustibile, come è stato rappresentato in figura 1.3. La formazione di questo strato liquido è osservata in combustibili con bassa temperatura di fusione. La instabilizzazione di questo può avvenire se lo strato liquido ha bassa viscosità e bassa tensione superficiale. Il comportamento dell'instabilizzazione e le caratteristiche delle goccioline create variano con le proprietà fisiche dei reagenti e con le condizioni operative del motore.

Quindi il fenomeno di *entrainment* avviene solo quando specifici combustibili sono utilizzati. Le caratteristiche necessarie per la formazione dello strato liquido e il conseguente trascinamento di goccioline sono trovate nei solidi criogenici e negli alcani. Alcuni dei solidi criogenici testati con successo nella propulsione ibrida presentando il fenomeno di *entrainment* sono il monossido di carbonio (CO), l'ossigeno (O₂) e l'idrogeno (H₂). Nel caso degli alcani il trascinamento di goccioline in un motore ibrido può essere osservato con l'uso di paraffine come combustibile solido.

Nella propulsione ibrida con il fenomeno di *entrainment* la combustione avviene tra l'ossidante gassoso e il combustibile sotto forma di goccioline, e non sotto forma vaporizzata. Allora l'aumento della velocità di regressione della superficie del grano di combustibile solido dovuto al trascinamento di goccioline di combustibile può essere spiegato per due motivi principali:

- Le goccioline di combustibile, che sono nello stato liquido, devono assorbire calore di fusione nella loro formazione. Questo è inferiore al calore di vaporizzazione che il vapore di combustibile deve assorbire nella sua formazione. Quindi, considerando lo stesso flusso di calore dalla combustione,

la formazione di goccioline avviene più velocemente che la formazione di vapore di combustibile. Ciò significa che nella propulsione ibrida la velocità di regressione della superficie del grano di combustibile solido è maggiore in presenza del fenomeno di *entrainment* che nel caso tradizionale.

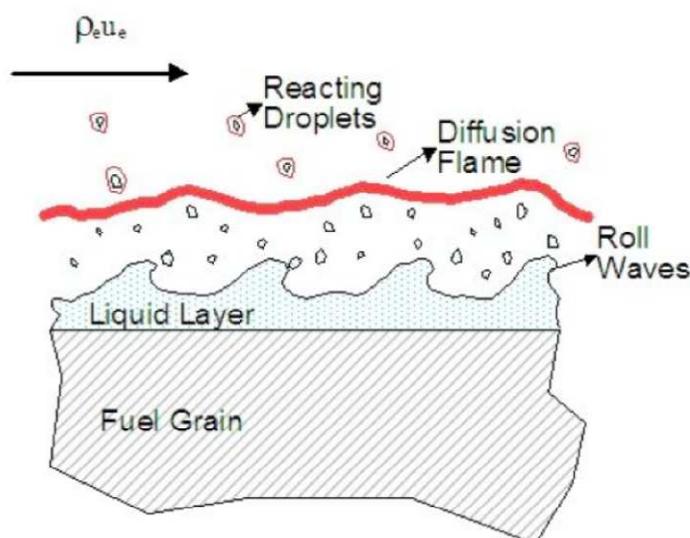


Figura 1.3: Il fenomeno di *entrainment* (tratta da [2])

- Il trasferimento di massa gassosa di combustibile vaporizzato dalla superficie solida alla fiamma causa un effetto di bloccaggio che riduce il trasferimento di calore convettivo alla superficie solida, riducendo la velocità di regressione della superficie del grano di combustibile solido. Nel caso con trascinamento di goccioline il trasferimento di massa gassoso è ridotto, il che significa che anche il successivo effetto di bloccaggio è ridotto. Pertanto la riduzione della velocità di regressione della superficie del grano di combustibile solido dovuta all'effetto di bloccaggio è minore in presenza del fenomeno di *entrainment* che nel caso tradizionale.

1.2 Obiettivi della tesi

L'aumento della velocità di regressione della superficie del grano di combustibile solido nella propulsione ibrida causato dal fenomeno di *entrainment* dipende dalle caratteristiche delle goccioline di combustibile create, principalmente dal diametro di queste. Per questo motivo è di grande interesse conoscere quali proprietà dei reagenti e quali condizioni operative del motore

cambiano il diametro medio delle goccioline generate, e in che maniera avvengono questi cambiamenti. È così possibile progettare un motore di tipo ibrido con la tecnica del fenomeno di *entrainment* per ottenere la maggiore velocità di regressione della superficie del grano di combustibile solido possibile.

Per questo l'obiettivo di questa tesi è condurre l'analisi della variazione del diametro delle goccioline create dal fenomeno di *entrainment* nella propulsione ibrida secondo i seguenti parametri:

- Viscosità dello strato liquido di combustibile.
- Spessore dello strato liquido di combustibile.
- Velocità del flusso gassoso di ossidante.
- Profilo di velocità del flusso gassoso di ossidante.

Inoltre è stato deciso di sviluppare tale analisi con il *software* libero *Gerris Flow Solver* che è in grado di risolvere le equazioni differenziali parziali che descrivono il comportamento dei fluidi. In questa maniera si può simulare in un ambiente computazionale il fenomeno di *entrainment* tra il flusso di ossidante gassoso e lo strato liquido di combustibile.

Alla fine di questa tesi si spera di conoscere in che maniera la variazione dei parametri precedentemente elencati influenza il diametro delle goccioline di combustibile create dal fenomeno di *entrainment* nella propulsione ibrida.

Capitolo 2

Stato dell'arte

In questo capitolo sono presentati i lavori che hanno fornito la base teorica per lo sviluppo di questa tesi. Questi lavori sono gli articoli tecnici *Combustion of Liquefying Hybrid Propellants: Part 1, General Theory* di M. A. Karabeyoglu, D. Altman e B. J. Cantwell [3], e *Combustion of Liquefying Hybrid Propellants: Part 2, Stability of Liquid Films* di M. A. Karabeyoglu e B. J. Cantwell [4].

2.1 Contenuto essenziale dell'articolo *Combustion of Liquefying Hybrid Propellants: Part 1, General Theory* di M. A. Karabeyoglu, D. Altman, e B. J. Cantwell [3]

In questo articolo tecnico gli autori si sono proposti di generalizzare la teoria classica della propulsione ibrida affinché questa possa essere estesa ai casi dove sono utilizzati combustibili solidi che formano uno strato liquido alla superficie, come i solidi criogenici e le paraffine.

In altri lavori sono stati fatti esperimenti con motori ibridi che utilizzano combustibili solidi che formano uno strato liquido alla superficie. Utilizzando i dati di questi esperimenti sono stati calcolati le rispettive velocità di regressione della superficie del grano di combustibile solido. I risultati ottenuti sono presentati in figura 2.1.

Si osserva che il pentano e la paraffina presentano velocità di regressione della superficie del grano di combustibile solido da tre a quattro volte superiori a quella ottenuta con HTPB (polibutadiene a terminazione idrossilica). Il pentano e la paraffina sono combustibili solidi che formano uno strato liquido alla superficie, mentre HTPB è il combustibile solido tradizionalmente utilizzato nella propulsione ibrida e, quindi, non forma questo strato liquido. Questi risultati non possono essere spiegati con la teoria classica della propulsione ibrida, il che giustifica l'obiettivo degli autori di generalizzare questa teoria. Secondo gli autori le maggiori velocità di regressione della superficie del grano di combustibile solido osservate per il pentano e per la paraffina sono causate dal fenomeno di *entrainment*, e questo non è previsto nella teoria classica della propulsione ibrida.

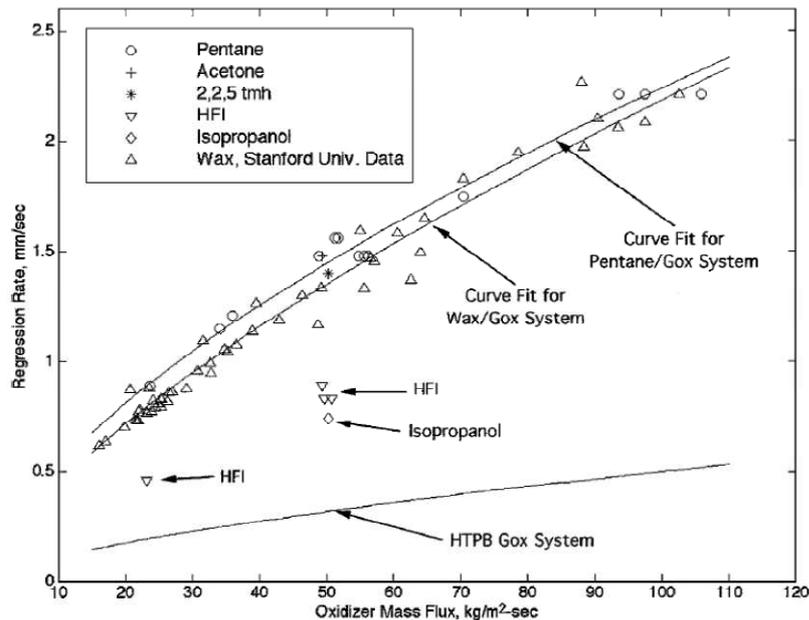


Figura 2.1: Velocità di regressione della superficie del grano di combustibile solido ottenute per diversi combustibili solidi (tratta da [3])

Per fare questa generalizzazione è stato necessario sviluppare espressioni per due parametri di grande importanza nel fenomeno di *entrainment*. Questi sono lo spessore dello strato liquido e la portata massica di combustibile liquido trascinato dallo strato liquido. Lo sviluppo dell'espressione per lo spessore dello strato liquido è stato fatto tramite l'analisi termica del modello rappresentato in figura 2.2.

Nella letteratura c'è una espressione per la portata massica delle goccioline trascinate da uno strato liquido sotto l'effetto di un forte flusso gassoso. Però questa espressione non tiene in conto la riduzione dello spessore dello strato liquido. Gli autori dell'articolo hanno considerato che questa semplificazione potrebbe creare errori non trascurabili e, quindi, hanno deciso di correggere questa espressione affinché questa tenga in conto la riduzione dello spessore dello strato liquido.

Nella letteratura c'è anche una relazione empirica che fornisce le condizioni critiche affinché il fenomeno di *entrainment* avvenga. Utilizzando le proprietà fisiche di diversi combustibili solidi le curve presentate in figura 2.3 sono state create utilizzando questa relazione.

Le curve rappresentano la condizione critica per il fenomeno di *entrainment* per ogni combustibile; in altre parole il fenomeno di *entrainment* avviene solo se il punto di funzionamento del motore si trova sopra la curva critica del rispettivo combustibile solido. Si osserva che, per la paraffina e per il

pentano, la regione dove il fenomeno di *entrainment* avviene è grande a confronto di altri combustibili. Quindi entrambi sono buone opzioni di combustibile solido per avere l'occorrenza del fenomeno di *entrainment*.

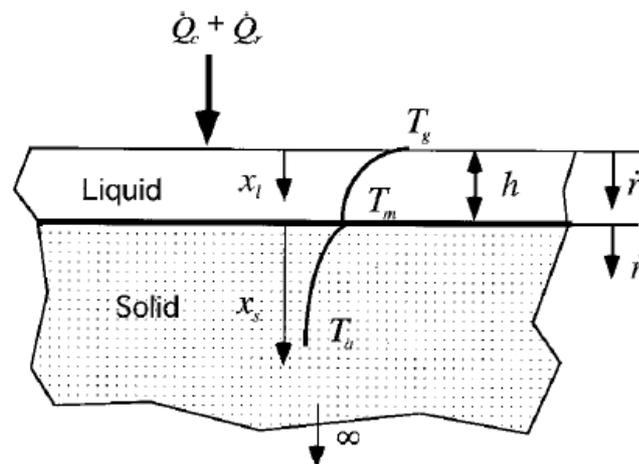


Figura 2.2: Modello termico utilizzato per lo sviluppo dell'espressione dello spessore dello strato liquido (tratta da [3])

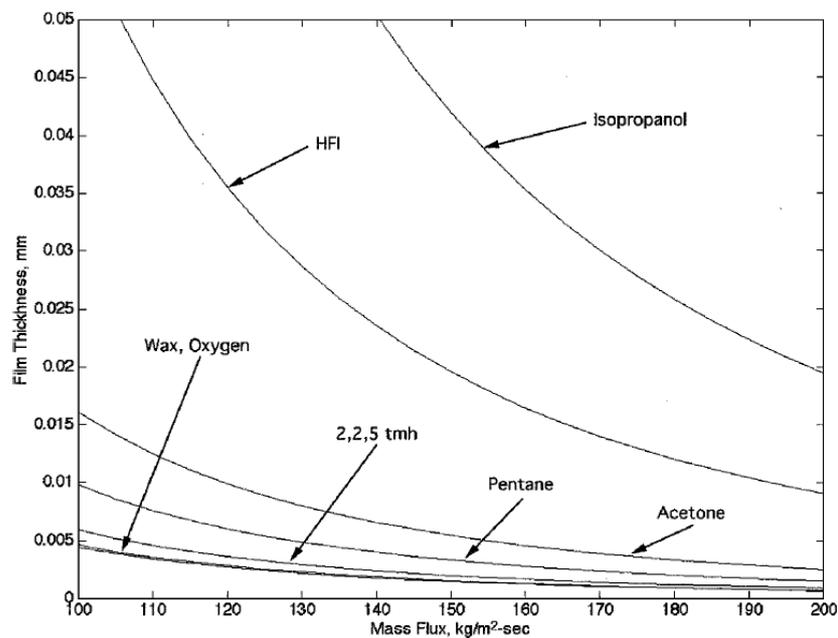


Figura 2.3: Condizioni critiche per l'occorrenza del fenomeno di *entrainment* per ogni combustibile solido (tratta da [3])

La generalizzazione della teoria classica della propulsione ibrida, affinché questa tenga in conto la presenza della fase liquida di combustibile e il trascinamento di goccioline dalla fase liquida, è stata fatta tramite tre modificazioni della teoria classica originale:

- Il calore di vaporizzazione effettivo (calore per unità di massa necessario per il trasferimento di combustibile dalla superficie solida alla fiamma) è stato ridotto perché parte del trasferimento di massa avviene tramite il fenomeno di *entrainment*. Il combustibile trasferito tramite il trascinamento di goccioline non si trasforma in vapore e, quindi, il calore assorbito da questo (calore di fusione) è inferiore al calore assorbito dal combustibile gassoso (calore di vaporizzazione).

- Il fattore di bloccaggio è stato modificato perché il trasferimento di massa del combustibile tramite il fenomeno di *entrainment* non causa un effetto di bloccaggio. Questo fattore determina la diminuzione del flusso termico convettivo alla superficie solida causata dall'effetto di bloccaggio del trasferimento gassoso di massa di combustibile dalla superficie solida alla fiamma. Siccome il trasferimento di massa tramite il fenomeno di *entrainment* avviene nella fase liquida, l'effetto di bloccaggio totale creato è inferiore.

- Le onde create nello strato liquido dovute all'instabilizzazione di questo aumentano la rugosità della superficie e, quindi, aumentano anche il flusso termico dalla fiamma alla superficie.

2.2 Contenuto essenziale dell'articolo *Combustion of Liquefying Hybrid Propellants: Part 2, Stability of Liquid Films* di M. A. Karabeyoglu e B. J. Cantwell [4]

In questo articolo tecnico gli autori si sono proposti di analizzare la stabilità di uno strato liquido sotto l'effetto di un forte flusso gassoso. Questa analisi è di grande importanza per la propulsione ibrida perché una condizione necessaria affinché il fenomeno di *entrainment* avvenga è l'instabilizzazione dello strato liquido di combustibile che si forma alla superficie solida di alcuni combustibili solidi, come i solidi criogenici e le paraffine. Una rappresentazione del modello di stabilità che è stato studiato è presentata in figura 2.4.

Considerando che l'interfaccia tra lo strato liquido e il flusso gassoso prende la forma di una onda armonica, le equazioni di Navier-Stokes sono state derivate. Il risultato ottenuto da questa derivazione è stato una equazione differenziale ordinaria del quarto ordine chiamata equazione di Orr-Sommerfeld che regola la stabilità di uno strato liquido.

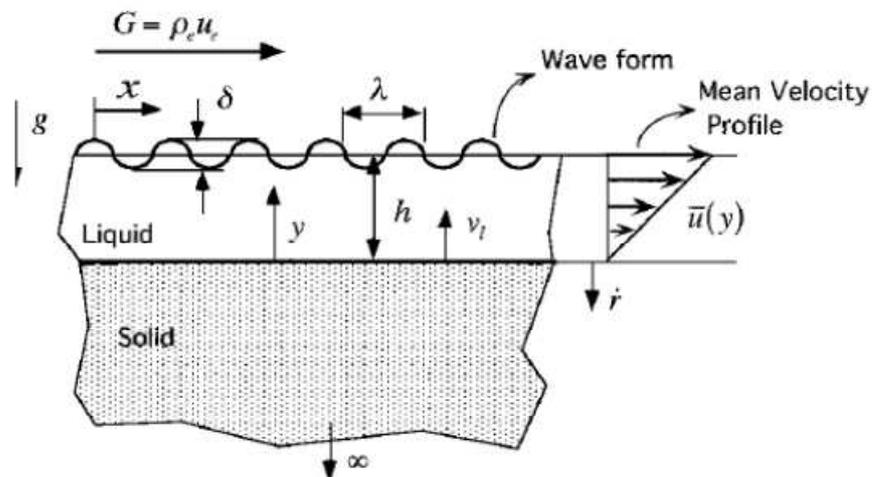


Figura 2.4: Modello di stabilità studiato (tratta da [4])

Per risolvere l'equazione di Orr-Sommerfeld sono state definite cinque condizioni al contorno e sono stati sviluppati due tipi di soluzioni. Le condizioni al contorno definite sono state le seguenti:

- Velocità parallela al flusso gassoso nulla alla superficie solida.
- Velocità di regressione della superficie del grano di combustibile solido costante.
- Condizione cinematica nella interfaccia tra lo strato liquido e il flusso gassoso.
- Equilibrio delle forze tangenziali.
- Equilibrio delle forze normali.

Il primo tipo di soluzione sviluppato è stato una soluzione in serie di potenza. Però le condizioni di convergenza di questa soluzione limitano il suo utilizzo per casi dove il numero di Reynolds del flusso gassoso è inferiore a uno. Questa grande limitazione della soluzione in serie di potenza ha portato gli autori a sviluppare una soluzione esatta per l'equazione di Orr-Sommerfeld perché si può utilizzare questa soluzione per qualsiasi numero di Reynolds del flusso gassoso.

La risoluzione del problema della stabilità dello strato liquido di combustibile richiede la conoscenza delle proprietà del flusso gassoso. Dunque sono state presentate le equazioni e le approssimazioni, ottenute da altri lavori, per la determinazione delle proprietà necessarie del flusso gassoso.

In questa maniera con l'equazione di Orr-Sommerfeld si può calcolare il tasso di amplificazione delle instabilizzazioni dello strato liquido. Questo tasso di amplificazione è direttamente legato all'occorrenza del fenomeno di

entrainment perché quanto maggiore è il tasso di amplificazione, tanto maggiori sono le instabilizzazioni e tanto maggiore è il trascinamento di goccioline. Allora sono state analizzate gli effetti del numero di Reynolds del flusso gassoso, della velocità di regressione della superficie del grano di combustibile solido, della viscosità del combustibile e della tensione superficiale del combustibile nel tasso di amplificazione. I risultati ottenuti sono presentati nelle figure 2.5, 2.6, e 2.7.

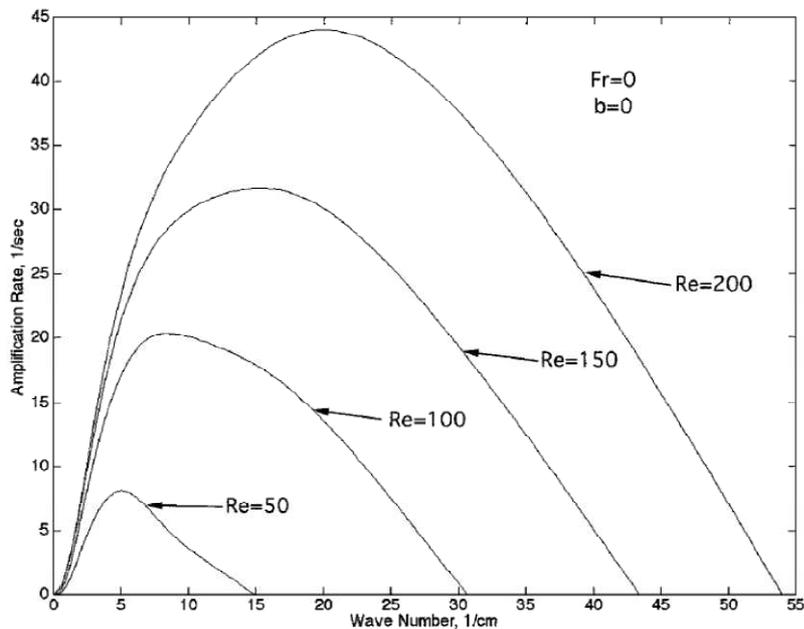


Figura 2.5: Effetto del numero di Reynolds del flusso gassoso nel tasso di amplificazione delle instabilizzazioni (tratta da [4])

Si osserva che l'aumento del numero di Reynolds del flusso gassoso tende a instabilizzare lo strato liquido, mentre gli aumenti della velocità di regressione della superficie del grano di combustibile solido, della viscosità del combustibile e della tensione superficiale del combustibile tendono a stabilizzare lo strato liquido.

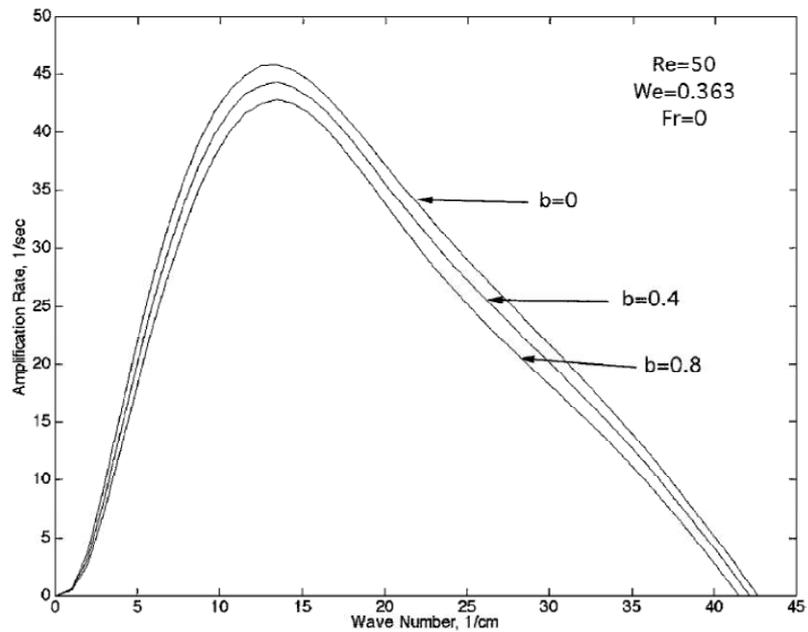


Figura 2.6: Effetto della velocità di regressione della superficie del grano di combustibile solido nel tasso di amplificazione delle instabilizzazioni (b è il parametro di velocità di regressione) (tratta da [4])

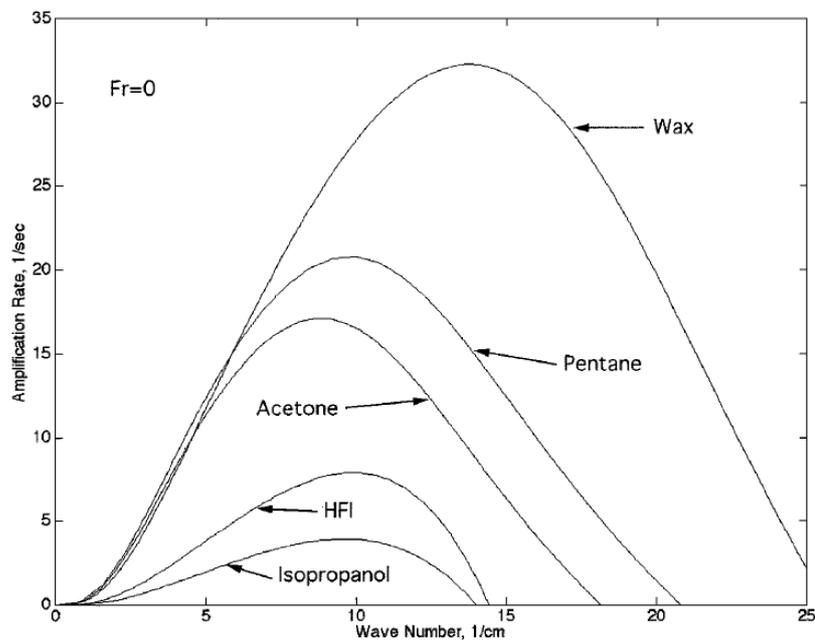


Figura 2.7: Effetto del combustibile solido nel tasso di amplificazione delle instabilizzazioni (tratta da [4])

Capitolo 3

Impianto metodologico della tesi

In questo capitolo sono presentati i metodi utilizzati nello sviluppo di questa tesi. Nella sezione 3.1 è stato descritto lo sviluppo del codice utilizzato per simulare il fenomeno di *entrainment* con il programma *Gerris Flow Solver*, e nella sezione 3.2 è stato descritto il metodo utilizzato per misurare con il programma *ImageJ* i diametri delle goccioline trascinate nelle simulazioni.

3.1 Simulazione del fenomeno di *entrainment* con il programma *Gerris Flow Solver*

In questa sezione è stato presentato lo sviluppo del codice utilizzato per simulare il fenomeno di *entrainment* con il programma *Gerris Flow Solver*. Inoltre nell'inizio della sezione è presentata una breve descrizione del *software*.

Il metodo utilizzato per sviluppare il codice è stato diviso nelle seguenti fasi principali: modellazione della geometria, definizione delle condizioni iniziali, definizione delle condizioni al contorno, definizione delle proprietà fisiche, definizione dei parametri di controllo, e presentazione della risposta. Queste fasi principali sono spiegate in dettaglio in questa sezione e la sequenza logica dei passi fatti nella creazione del codice è presentata in figura 3.1. Per maggiori dettagli il codice completo sviluppato in questa tesi è presentato nell'appendice A.

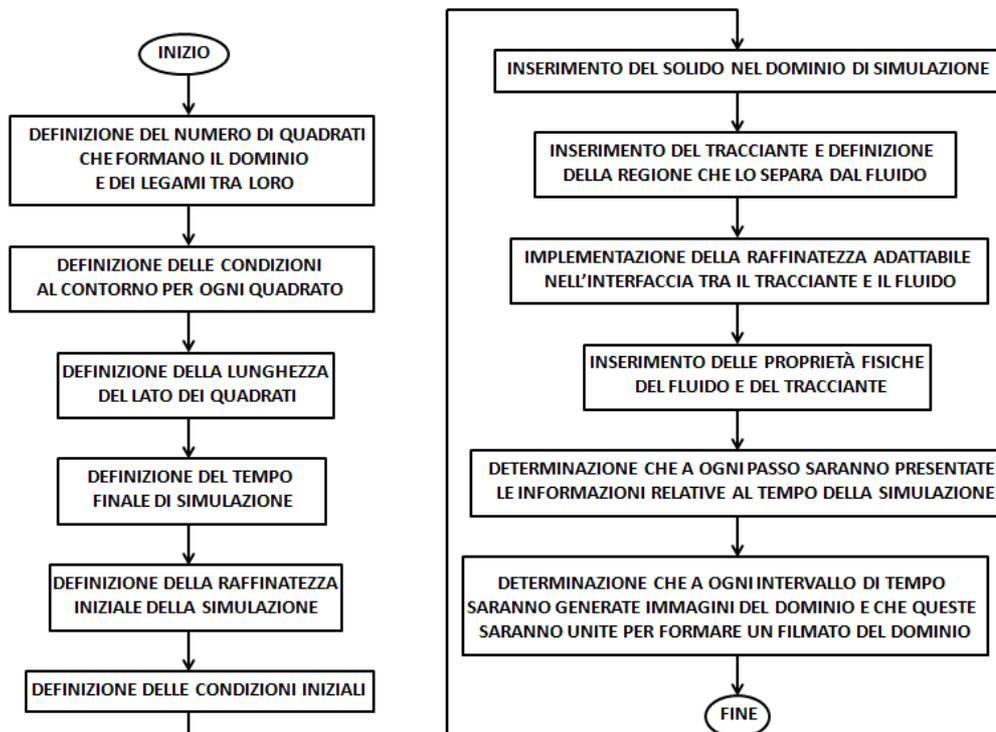


Figura 3.1: Descrizione della sequenza logica utilizzata nello sviluppo del codice per simulare il fenomeno di *entrainment* con il programma *Gerris Flow Solver*

3.1.1 Descrizione del programma *Gerris Flow Solver*

Il programma *Gerris Flow Solver* è un *software* libero sviluppato per risolvere le equazioni differenziali parziali che descrivono i flussi dei fluidi. Questo è stato creato nel 2001 da Stéphane Popinet per essere utilizzato in sistemi operazionali di tipo Linux, ed è stato battezzato con il nome in latino e francese dell'insetto conosciuto come *water strider* capace di muoversi sulla superficie dell'acqua. In figura 3.2 è stato presentato il logo del programma dove è stato rappresentato l'insetto *water strider*.

Il *Gerris Flow Solver* risolve le equazioni incompressibili e adimensionali di Navier-Stokes, sia nella forma bidimensionale come nella forma tridimensionale. Per fare questo il programma utilizza una discretizzazione del volume finito ottenuta tramite una struttura di dati *quadtree* nel caso bidimensionale ed *octree* nel caso tridimensionale. Il vantaggio di questi tipi di discretizzazione è la totale adattabilità della maglia creata, sia nel tempo come nello spazio, alle caratteristiche dinamiche del flusso. Questo

fornisce guadagni sia nel costo computazionale come nella precisione computazionale.

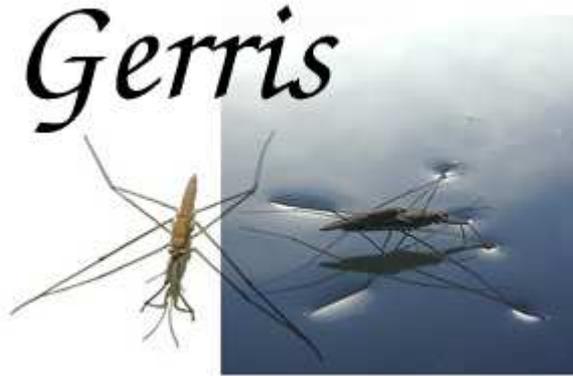


Figura 3.2: Logo del programma *Gerris Flow Solver* (tratto da [5])

Altre importanti caratteristiche del *software* sono: la capacità di creare maglie automaticamente per geometrie complesse, la possibilità di utilizzare un numero illimitato di traccianti passivi di avvezione e diffusione per seguire un flusso, la possibilità di modificare il codice del programma secondo le necessità dell'utente, e la presenza di molte condizioni al contorno già incorporate nel *software*.

3.1.2 Modellazione della geometria

Il passo iniziale nello sviluppo del codice utilizzato per simulare il fenomeno di *entrainment* con il programma *Gerris Flow Solver* è la modellazione della geometria che rappresenterà la camera di combustione di un motore ibrido. Approssimando la camera ad una condizione bidimensionale si vuole creare una geometria che consiste nel passaggio del flusso gassoso di ossidante tra la parete della camera di combustione ed il grano di combustibile solido, sulla cui superficie si trova lo strato liquido di combustibile.

Nel caso bidimensionale del *software* il dominio di simulazione è creato da quadrati identici dove il numero di quadrati e le loro posizioni devono essere definite dal codice. In questa maniera per rappresentare il caso descritto precedentemente sono stati utilizzati otto quadrati: quattro formando una linea orizzontale superiore e quattro formando una linea orizzontale inferiore. La linea di quadrati superiore rappresenta la regione dove si trova il flusso gassoso di ossidante e la linea di quadrati inferiore rappresenta la regione dove si trova lo strato liquido di combustibile.

In un motore ibrido reale lo spessore dello strato liquido di combustibile è minore dell'altezza della sezione di passaggio del flusso gassoso. Per considerare questa caratteristica nella geometria del codice un solido rettangolare di lunghezza pari alla linea di quadrati è stato messo nella parte inferiore della linea di quadrati inferiore. In questa maniera si può controllare lo spessore dello strato liquido di combustibile tramite la variazione dell'altezza del solido. Il controllo dello spessore dello strato liquido è essenziale per questa tesi perché la conoscenza dell'effetto della variazione di questo parametro sul diametro delle goccioline trascinate è uno degli obiettivi da raggiungere.

Inoltre nel codice si deve imporre che il combustibile e l'ossidante sono fluidi diversi. Questo è stato fatto considerando lo strato liquido di combustibile come un tracciante. In questa maniera sono stati assegnati colori diversi per ogni fluido, permettendo la visualizzazione delle goccioline nel flusso gassoso.

La geometria creata con il codice sviluppato è stata presentata in figura 3.3 ottenuta dal programma *Gerris Flow Solver*. Il limite superiore della figura corrisponde al limite superiore della linea di quadrati superiore e rappresenta la parete della camera di combustione. Il limite inferiore, invece, corrisponde alla superficie superiore del solido rettangolare e rappresenta la superficie del grano solido di combustibile. Il flusso gassoso di ossidante è stata rappresentato in rosso e lo strato liquido di combustibile è stato rappresentato in blu.



Figura 3.3: Geometria creata per rappresentare bidimensionalmente la camera di combustione di un motore ibrido

3.1.3 Definizione delle condizioni iniziali

Le condizioni iniziali che devono essere imposte perché sia possibile eseguire le simulazioni sono di due tipi. Il primo tipo fornisce le velocità dei fluidi nell'istante iniziale. Nella direzione verticale è stato imposto che la velocità è nulla in tutto il dominio. Questo è stato fatto perché nei motori ibridi il flusso avviene principalmente nella direzione parallela alla parete della camera di combustione, che corrisponde alla direzione orizzontale nel modello definito nel punto precedente.

Nella direzione orizzontale, invece, è stato imposto che il flusso gassoso e il flusso liquido sono completamente sviluppati nell'istante iniziale in tutto il dominio. Questo è stato fatto perché si vuole simulare l'occorrenza del fenomeno di *entrainment* in un motore ibrido in pieno svolgimento.

Per la fase liquida è stato utilizzato un profilo di velocità lineare. Per la fase gassosa, invece, sono stati utilizzati profili di velocità diversi per ogni caso studiato perché la conoscenza dell'effetto della variazione di questo profilo nel diametro delle goccioline trascinate è uno degli obiettivi da raggiungere. Inoltre è stato supposto che la relazione tra la velocità della fase liquida nell'interfaccia tra le due fasi e la velocità della fase gassosa nello stesso luogo è pari a 0,01, e che la relazione tra la velocità della fase gassosa nell'interfaccia tra le due fasi e la velocità della fase gassosa nel centro della sezione di passaggio è anche essa pari a 0,01.

Il secondo tipo di condizione iniziale che deve essere definito è la regione di separazione tra la fase liquida e la fase gassosa nell'istante iniziale. È stato imposto che questa regione ha la forma di una retta orizzontale e si trova dove le due linee di quadrati che definiscono il dominio si incontrano; in altre parole, questa regione si trova nel centro del dominio di simulazione. È stato deciso di utilizzare una retta orizzontale per rappresentare la regione di separazione iniziale tra le due fasi perché si vuole che la formazione delle instabilizzazioni dello strato liquido avvenga naturalmente.

3.1.4 Definizione delle condizioni al contorno

Le condizioni al contorno sono state definite secondo il modello descritto nel punto 3.1.2. Dunque i limiti superiore e inferiore devono essere modellati come superfici solide perché rappresentano la parete della camera di combustione e la superficie del grano di combustibile solido, rispettivamente. Per fare questo è stato imposto che in entrambi i limiti la velocità nella direzione orizzontale e la velocità nella direzione verticale sono nulle.

Il limite sinistro deve rappresentare l'ingresso dei flussi gassoso di ossidante e liquido di combustibile nel dominio di simulazione. Per fare questo sono state imposte come condizioni al contorno le stesse condizioni di velocità utilizzate come condizioni iniziali per il dominio. Questo è stato fatto perché si

vuole rappresentare il motore ibrido in pieno svolgimento. Pertanto le velocità nella direzione verticale sono nulle, il profilo di velocità nella direzione orizzontale della fase liquida è lineare, ed il profilo di velocità nella direzione orizzontale della fase gassosa è diverso per ogni caso studiato perché la conoscenza dell'effetto della variazione di questo profilo nel diametro delle goccioline trascinate è uno degli obiettivi da raggiungere.

Dall'altra parte il limite destro rappresenta l'uscita dei flussi gassoso di ossidante e liquido di combustibile del dominio di simulazione. Per fare questo è stata imposta come condizione al contorno una condizione di flusso libero per le fasi gassosa e liquida. Questo è stato fatto con una funzione specifica già incorporata nel programma *Gerris Flow Solver*.

3.1.5 Definizione delle proprietà fisiche

Per simulare il fenomeno di *entrainment* è necessario inserire nel codice la densità e la viscosità dell'ossidante gassoso, e la densità, la viscosità e la tensione superficiale del combustibile liquido. La sostanza utilizzata come ossidante è stato l'aria a 15 °C, mentre il materiale utilizzato come combustibile è stato una paraffina, le cui proprietà sono state ottenute dal riferimento [3]. I valori che sono stati utilizzati sono stati presentati nella tabella 3.1.

Tabella 3.1: Proprietà fisiche dell'aria e della paraffina

	Aria (15 °C)	Paraffina [3]
Densità (kg/m³)	1,225	654,4
Viscosità (μPa*s)	17,8	650
Tensione superficiale (mN/m)	-	7,1

Come è stato descritto nel punto 3.1.1 il programma *Gerris Flow Solver* lavora con le equazioni adimensionali di Navier-Stokes. Per questa ragione i valori della densità e della viscosità devono essere adimensionalizzati. Questo è stato fatto inserendo nel codice la relazione tra le densità delle due sostanze e la relazione tra le viscosità delle due sostanze. Dall'altra parte la tensione superficiale è stata adimensionalizzata dal *software* tramite l'utilizzo di una funzione specifica per mettere questo parametro nel codice.

3.1.6 Definizione dei parametri di controllo

Ci sono due parametri di controllo della simulazione che sempre devono essere definiti. Questi sono il tempo finale della simulazione e la raffinatezza iniziale della discretizzazione del dominio di simulazione. Il tempo finale della

simulazione è stato scelto in ogni caso in modo tale da avere un compromesso tra un tempo di simulazione non troppo lungo e il trascinarsi di un numero ragionevole di goccioline.

Inizialmente questa scelta è stata fatta empiricamente perché il numero di goccioline trascinate non era ancora stato conteggiato. Dopo, durante la misurazione dei diametri, il numero di goccioline trascinate in ogni simulazione è stato conteggiato e, quindi, le simulazioni dei casi dove sono state trascinate poche goccioline sono state rifatte con tempi di simulazioni più lunghi. Inoltre come raffinatezza iniziale è stato utilizzato un valore dello stesso ordine di quelli usati dallo sviluppatore del programma *Gerris Flow Solver* in modelli bidimensionali [6].

Oltre a questi due parametri è stato definito che l'interfaccia tra la fase liquida e la fase gassosa dovrebbe avere una raffinatezza più elevata durante tutta la simulazione. Questo è stato fatto perché l'interfaccia tra le due fasi corrisponde alla superficie dello strato liquido e alle superfici delle goccioline, che sono le regioni di interesse per questa tesi. Questa raffinatezza più elevata è stata messa tramite una raffinatezza adattabile nell'interfaccia tra le due fasi in ogni passo della simulazione; in altre parole, a ogni passo della simulazione il programma utilizza una raffinatezza maggiore per descrivere le regioni dove c'è un incontro tra le due fasi.

3.1.7 Presentazione dei risultati

Per misurare i diametri delle goccioline trascinate durante le simulazioni è stato necessario avere come risposta del programma *Gerris Flow Solver* una rappresentazione visiva del dominio di simulazione lungo il tempo di simulazione. Per questa ragione è stato definito che per intervalli regolari della simulazione vengano generate immagini del dominio di simulazione nell'istante specifico. Inoltre si è operato affinché il *software* provveda ad assemblare le immagini e creare un filmato del dominio di simulazione.

In questa maniera si può osservare l'occorrenza del fenomeno di *entrainment* e si possono misurare i diametri delle goccioline con un programma di elaborazione di immagini. In figura 3.4 è presentata una delle immagini ottenute con il programma *Gerris Flow Solver* utilizzando il codice sviluppato in questa tesi, mentre in figura 3.5 è presentato un ingrandimento dell'area evidenziata nella figura 3.4 per meglio osservare il fenomeno di *entrainment*. Si può osservare nelle figure la presenza delle goccioline trascinate e l'instabilizzazione dello strato liquido, che è una condizione necessaria per avere il trascinarsi delle goccioline.

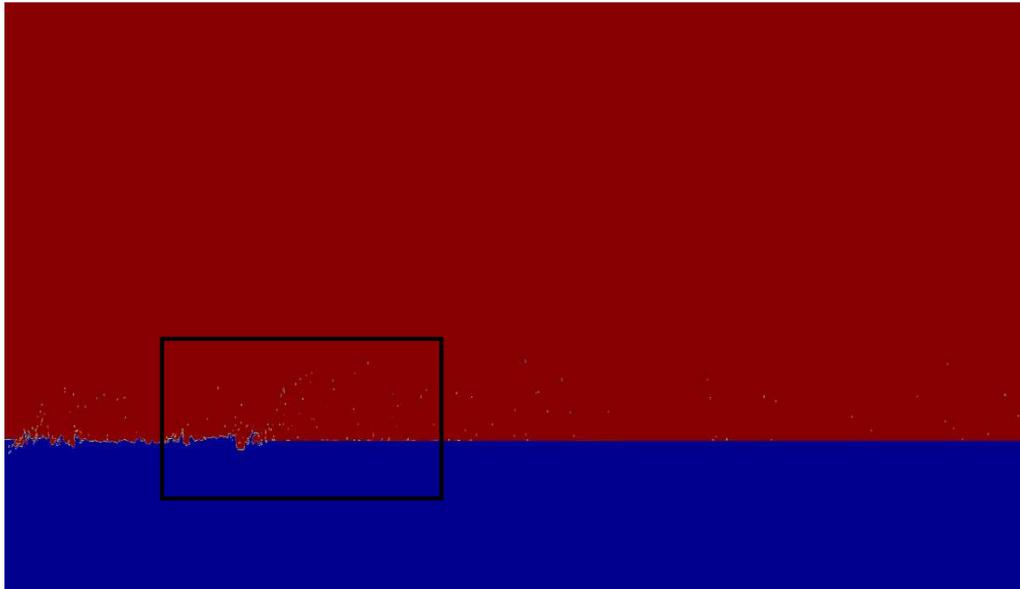


Figura 3.4: Immagine del fenomeno di *entrainment* ottenuta con la simulazione del codice sviluppato per il programma *Gerris Flow Solver*

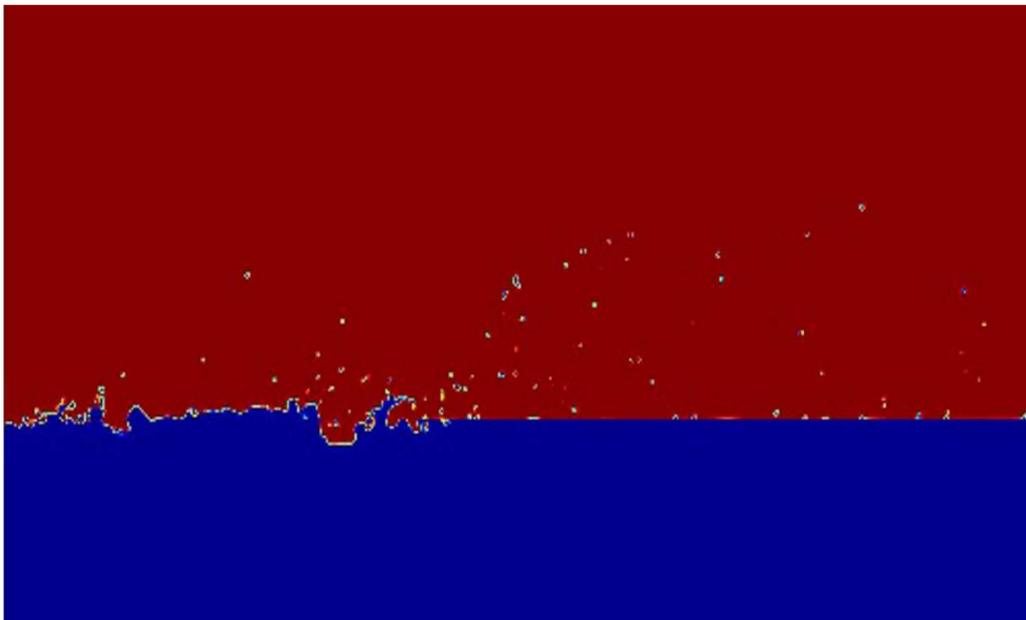


Figura 3.5: Ingrandimento dell'area evidenziata nella figura 3.4

3.2 Misura dei diametri delle goccioline con il programma *ImageJ*

I risultati delle simulazioni del fenomeno di *entrainment* fatte con il programma *Gerris Flow Solver* sono filmati che mostrano l'evoluzione dei domini di simulazione lungo il tempo. Pertanto la misura dei diametri delle goccioline può essere fatta con un programma di elaborazione di immagini. Il programma scelto è stato il *software* libero *ImageJ*.

Per raggiungere gli obiettivi di questa tesi il programma *ImageJ* è stato utilizzato per misurare, nelle immagini ottenute dalle simulazioni fatte con il programma *Gerris Flow Solver*, la lunghezza della regione corrispondente a una gocciolina trascinata dallo strato liquido di combustibile. Supponendo che le goccioline presentano una forma simile a un cerchio nelle immagini si può approssimare il diametro delle goccioline a questa lunghezza misurata. In figura 3.6 è presentata una immagine di una misura del diametro di una gocciolina con il programma *ImageJ*. La linea gialla che divide la gocciolina rappresenta la lunghezza misurata con il programma *ImageJ*. Si noti che è stato utilizzato un ingrandimento esagerato dell'immagine per una facile visualizzazione.

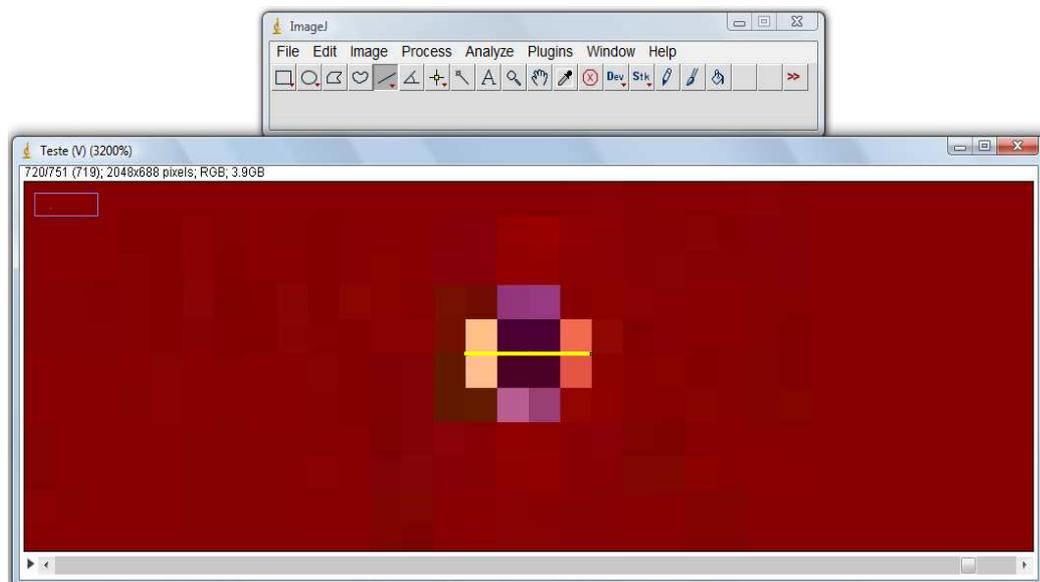


Figura 3.6: Immagine della misurazione del diametro di una gocciolina con il programma *ImageJ*

Pertanto la misura del diametro delle goccioline corrisponde alla misura di una lunghezza nello schermo del computer. Per questo i risultati ottenuti sono in *pixel* e questi devono essere convertiti a una unità del Sistema Internazionale

di Unità. Questo è stato fatto con una lunghezza delle immagini il cui valore è noto nel Sistema Internazionale di Unità. Per fare questo è stato utilizzato lo spessore dello strato liquido perché questa variabile è uno dei parametri della simulazione e, quindi, è fornita dall'utente del codice.

Il programma *ImageJ* è un *software* di elaborazione di immagini e, quindi, i filmati ottenuti dalle simulazioni fatte con il codice sviluppato nella sezione 3.1 devono essere frammentati in immagini perché si possa utilizzare il programma *ImageJ*. Questa frammentazione dei filmati è stata fatta con il *software* libero *VirtualDub* di elaborazione di filmati. I frammenti dei filmati sono stati messi insieme nel programma *ImageJ* formando una sequenza di immagini. In questa maniera per ogni simulazione il programma automaticamente mette insieme tutti i diametri misurati nello stesso file.

Capitolo 4

Analisi ed interpretazione dei risultati ottenuti

In questo capitolo sono presentati i risultati ottenuti in questa tesi e sono fatte le analisi relative a questi risultati. Inizialmente sono descritti i casi che sono stati simulati con il codice sviluppato ed è presentata la procedura utilizzata nell'analisi statistica dei valori misurati per i diametri delle goccioline create nelle simulazioni. In seguito sono presentati i risultati e le analisi relative agli effetti della viscosità del combustibile, dello spessore dello strato liquido di combustibile, della velocità del flusso gassoso di ossidante, e del profilo di velocità del flusso gassoso di ossidante.

4.1 Descrizione delle prove condotte

L'obiettivo principale di questa tesi è analizzare gli effetti della viscosità del combustibile, dello spessore dello strato liquido di combustibile, della velocità del flusso gassoso di ossidante, e del profilo di velocità del flusso gassoso di ossidante nei diametri delle goccioline create dal fenomeno di *entrainment* in motori di tipo ibrido.

Per fare questo sono state fatte simulazioni del codice sviluppato con tre profili diversi di velocità del flusso gassoso di ossidante e cinque valori diversi per gli altri parametri. Nella tabella 4.1 sono presentati i valori dei parametri utilizzati nei casi analizzati oltre al numero di goccioline misurate in ogni simulazione e al tempo finale utilizzato in ogni caso. È importante osservare che la velocità presentata nella tabella 4.1 è adimensionale perché rappresenta il rapporto tra la velocità reale del flusso gassoso di ossidante e la velocità di riferimento.

Tabella 4.1: Valori dei parametri utilizzati in ciascuna prova

Caso	Viscosità ($\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$)	Spessore (mm)	Velocità	Profilo di velocità	Numero di goccioline	Tempo di simulazione (s)
Standard	650	1,00	15,0	Parabolico	85	3,75
V1	300	1,00	15,0	Parabolico	73	2,60
V2	470	1,00	15,0	Parabolico	65	3,25
V3	770	1,00	15,0	Parabolico	76	3,75
V4	870	1,00	15,0	Parabolico	47	3,15
H1	650	0,66	15,0	Parabolico	63	3,40
H2	650	0,77	15,0	Parabolico	84	3,75
H3	650	1,12	15,0	Parabolico	40	3,25
H4	650	1,22	15,0	Parabolico	65	3,30
U1	650	1,00	12,4	Parabolico	40	4,10
U2	650	1,00	13,5	Parabolico	81	3,20
U3	650	1,00	16,2	Parabolico	73	3,45
U4	650	1,00	18,0	Parabolico	77	2,10
L	650	1,00	15,0	Lineare	44	4,85
DR	650	1,00	15,0	Due sezioni lineari	93	2,45

4.2 Descrizione dell'analisi statistica

La misura dei diametri delle goccioline create dal fenomeno di *entrainment* nelle simulazioni è stata fatta con un programma di elaborazione di immagini. Per questo, come è stato spiegato nel capitolo 3, il *software* fornisce i valori delle misure in *pixel* e questi devono essere convertiti a una unità del Sistema Internazionale di Unità. Questo è stato fatto tramite l'uso dello spessore dello strato liquido come riferimento perchè questo parametro deve essere fornito dall'utente del codice.

In questa maniera sono stati ottenuti i valori dei diametri in *micron* e, quindi, è stato possibile iniziare l'analisi statistica dei dati ottenuti. Il primo passo di questa analisi è stata la costruzione degli istogrammi dei diametri delle goccioline per ogni simulazione. Questo è stato fatto per conoscere il comportamento della distribuzione di questi diametri per ogni caso analizzato.

Il secondo passo dell'analisi statistica è stato il calcolo del diametro medio delle goccioline e dell'intervallo di confidenza per ogni simulazione. Il diametro medio è stato calcolato con una media aritmetica. Inoltre l'intervallo di

confidenza è stato ottenuto moltiplicando la deviazione standard della media per il valore della distribuzione t di Student con 95% di probabilità.

Con i valori dei diametri medi e degli intervalli di confidenza è stato possibile costruire i grafici che rappresentano la variazione del diametro delle goccioline in funzione della viscosità del combustibile, dello spessore dello strato liquido di combustibile, della velocità del flusso gassoso di ossidante, e del profilo di velocità del flusso gassoso di ossidante. Inoltre è stata redatta la linea di tendenza dei punti dei grafici per meglio osservare il comportamento dei diametri delle goccioline in funzione dei parametri elencati in precedenza.

Con questa analisi statistica è stato possibile condurre l'analisi delle simulazioni fatte e, quindi, trarre le possibili conclusioni rispetto agli effetti dei parametri nei diametri delle goccioline create dal fenomeno di *entrainment*.

4.3 Effetto della viscosità del combustibile

In questa sezione sono presentati e discussi i risultati ottenuti nell'analisi dell'effetto della viscosità del combustibile sul diametro delle goccioline create dal fenomeno di *entrainment*. In questa analisi sono stati considerati i casi standard, V1, V2, V3, e V4.

Gli istogrammi dei diametri delle goccioline ottenuti per i casi elencati in precedenza sono presentati nell'appendice B. Si osserva che gli istogrammi ottenuti assomigliano ad una distribuzione di probabilità normale e che gli istogrammi dei casi dove è stato misurato un numero maggiore di goccioline si avvicinano di più a questo tipo di distribuzione. Questo conferma il Teorema del Limite Centrale che dice che la distribuzione di una variabile tende a una distribuzione normale con l'aumento del numero di misure di questa variabile. Pertanto si può dire che le misure fatte per ottenere i diametri delle goccioline sono valide.

I diametri medi e gli intervalli di confidenza ottenuti per i casi analizzati sono presentati nella tabella 4.2. La rappresentazione grafica di questi valori è presentata in figura 4.1.

Si può osservare in figura 4.1 che il diametro delle goccioline create dal fenomeno di *entrainment* tende a diminuire con l'aumento della viscosità del combustibile. Questa rappresenta la resistenza del combustibile al flusso di ossidante gassoso. Pertanto la resistenza delle goccioline al trascinamento è minore quando la viscosità è minore.

Inoltre le goccioline di diametro grande hanno una resistenza maggiore al trascinamento perché queste hanno una superficie di contatto maggiore con lo strato liquido di combustibile. Pertanto è necessario ridurre la resistenza dello strato liquido al trascinamento perché le goccioline di diametro grande possano essere trascinate. Siccome la riduzione della viscosità dello strato liquido riduce

la resistenza delle goccioline al trascinamento, allora le goccioline di diametro grande cominciano ad essere trascinate, il che aumenta il diametro medio delle goccioline generate. Quindi il comportamento osservato in figura 4.1 è corretto.

Tabella 4.2: Valori dei diametri medi e degli intervalli di confidenza dei casi utilizzati nell'analisi dell'effetto della viscosità del combustibile

Caso	Diametro medio (μm)	Intervallo di confidenza (μm)
Standard	4,528	+/- 0,337
V1	4,777	+/- 0,366
V2	4,757	+/- 0,411
V3	4,477	+/- 0,332
V4	4,407	+/- 0,392

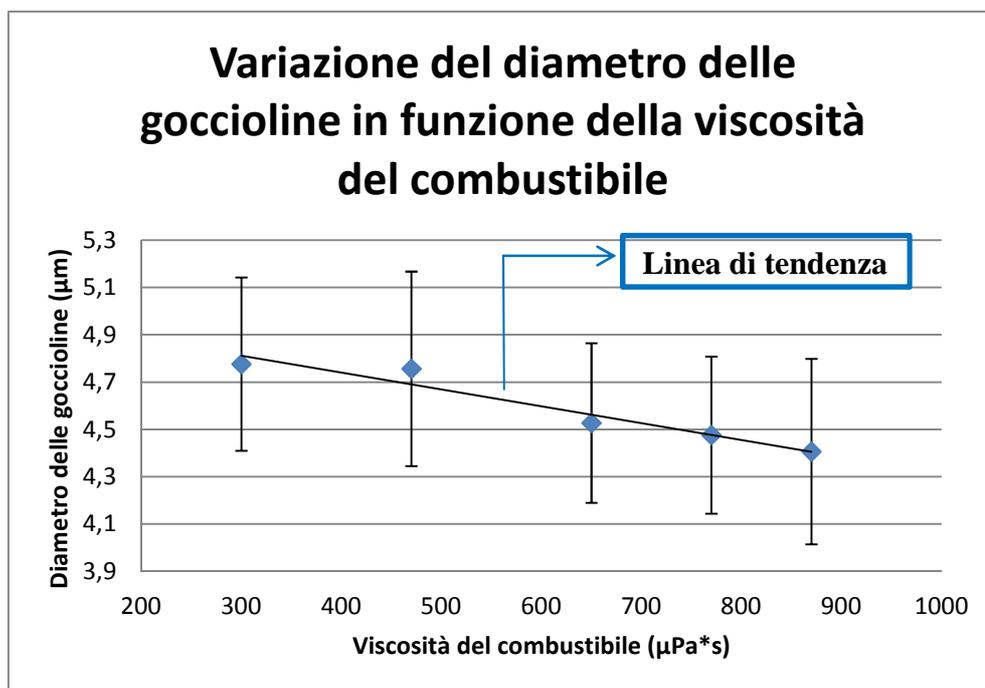


Figura 4.1: Rappresentazione grafica dei diametri medi e degli intervalli di confidenza dei casi utilizzati nell'analisi dell'effetto della viscosità del combustibile

La diminuzione del diametro delle goccioline dovuta all'aumento della viscosità del combustibile avviene linearmente, come indicato dalla linea di

tendenza in figura 4.1. L'equazione di questa linea di tendenza è presentata in seguito insieme al suo coefficiente di correlazione:

$$D = -0,0007 * \mu + 5,0238 \quad (4.1)$$

$$R^2 = 0,9398 \quad (4.2)$$

dove D è il diametro medio delle goccioline (μm), μ è la viscosità del combustibile ($\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$) e R^2 è il coefficiente di correlazione.

Siccome il coefficiente di correlazione è maggiore di 0,9 allora la rappresentazione della diminuzione del diametro delle goccioline dovuta all'aumento della viscosità del combustibile con un modello lineare è una buona approssimazione.

4.4 Effetto dello spessore dello strato liquido di combustibile

In questa sezione sono presentati e discussi i risultati ottenuti nell'analisi dell'effetto dello spessore dello strato liquido di combustibile sul diametro delle goccioline create dal fenomeno di *entrainment*. In questa analisi sono stati considerati i casi standard, H1, H2, H3, e H4.

Gli istogrammi dei diametri delle goccioline ottenuti per i casi elencati in precedenza sono presentati nell'appendice B. Come nella sezione 4.3 si osserva che gli istogrammi ottenuti assomigliano ad una distribuzione di probabilità normale e che gli istogrammi dei casi dove è stato misurato un numero maggiore di goccioline si avvicinano di più a questo tipo di distribuzione. Questo conferma il Teorema del Limite Centrale che dice che la distribuzione di una variabile tende a una distribuzione normale con l'aumento del numero di misure di questa variabile. Pertanto si può dire che le misure fatte per ottenere i diametri delle goccioline sono valide.

I diametri medi e gli intervalli di confidenza ottenuti per i casi analizzati sono presentati nella tabella 4.3. La rappresentazione grafica di questi valori è presentata in figura 4.2.

Si può osservare in figura 4.2 che il diametro medio delle goccioline create dal fenomeno di *entrainment* tende ad aumentare con l'aumento dello spessore dello strato liquido di combustibile. Questo comportamento può essere spiegato con la seguente equazione tratta da [3] che fornisce l'equilibrio della forza di taglio all'interfaccia tra lo strato liquido di combustibile e il flusso gassoso di ossidante:

$$c_f * P_d = \mu_l \frac{u_l}{h} \quad (4.3)$$

dove c_f è il coefficiente di attrito, P_d è la pressione dinamica del flusso gassoso (Pa), μ_l è la viscosità del combustibile liquido (mPa*s), u_l è la velocità del combustibile liquido all'interfaccia tra lo strato liquido di combustibile e il flusso gassoso di ossidante (m/s), e h è lo spessore dello strato liquido di combustibile (mm).

Tabella 4.3: Valori dei diametri medi e degli intervalli di confidenza dei casi utilizzati nell'analisi dell'effetto dello spessore dello strato liquido di combustibile

Caso	Diametro medio (μm)	Intervallo di confidenza (μm)
Standard	4,528	+/- 0,337
H1	4,217	+/- 0,373
H2	4,130	+/- 0,306
H3	4,666	+/- 0,391
H4	4,252	+/- 0,345

L'aumento dello spessore dello strato liquido di combustibile riduce il termine destro dell'equazione (4.3), il che significa che la forza di taglio all'interfaccia è minore. In altre parole l'aumento dello spessore dello strato liquido di combustibile riduce la resistenza del combustibile al flusso di ossidante gassoso. Pertanto la resistenza delle goccioline al trascinamento è minore quando lo spessore dello strato liquido è maggiore.

Da questo punto in avanti l'analisi è la stessa a quella fatta nella sezione 4.3 per la viscosità del combustibile liquido. Le goccioline di diametro grande hanno una resistenza maggiore al trascinamento perché queste hanno una superficie di contatto maggiore con lo strato liquido di combustibile. Pertanto è necessario ridurre la resistenza dello strato liquido al trascinamento perché le goccioline di diametro grande possano essere trascinate. Siccome l'aumento dello spessore dello strato liquido riduce la resistenza delle goccioline al trascinamento, allora le goccioline di diametro grande cominciano ad essere trascinate, il che aumenta il diametro medio delle goccioline generate. Quindi il comportamento osservato in figura 4.2 è corretto.

L'equazione della linea di tendenza presentata in figura 4.2 e il suo coefficiente di correlazione sono presentati in seguito:

$$D = 0,005 * h + 3,8652 \quad (4.4)$$

$$R^2 = 0,2854 \quad (4.5)$$

dove D è il diametro medio delle goccioline (μm), h è lo spessore dello strato liquido di combustibile (μm) e R^2 è il coefficiente di correlazione.

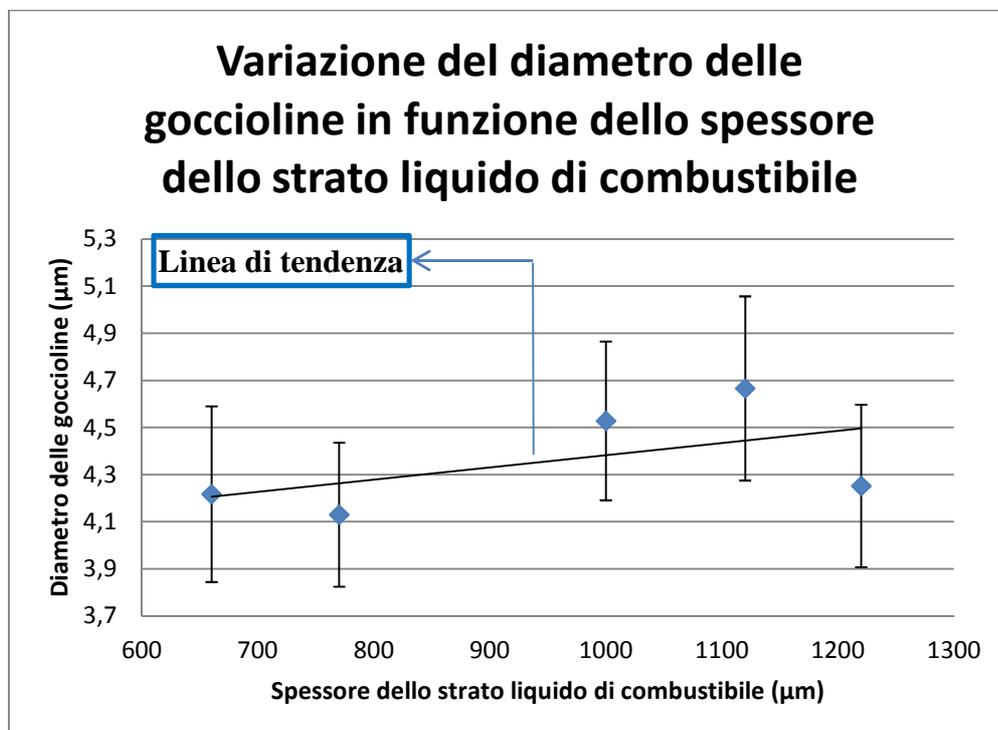


Figura 4.2: Rappresentazione grafica dei diametri medi e degli intervalli di confidenza dei casi utilizzati nell'analisi dell'effetto dello spessore dello strato liquido di combustibile

Si può osservare che il coefficiente di correlazione è molto inferiore a 0,9, il che significa che rappresentare la variazione del diametro delle goccioline create dal fenomeno di *entrainment* in funzione dello spessore dello strato liquido di combustibile con un modello lineare non è una buona approssimazione. Comunque questo modello può essere utilizzato per mostrare in maniera chiara che il diametro delle goccioline aumenta con l'aumento dello spessore dello strato liquido di combustibile.

4.5 Effetto della velocità del flusso gassoso di ossidante

In questa sezione sono presentati e discussi i risultati ottenuti nell'analisi dell'effetto della velocità del flusso gassoso di ossidante sul diametro delle

goccioline create dal fenomeno di *entrainment*. In questa analisi sono stati considerati i casi standard, U1, U2, U3, e U4.

Gli istogrammi dei diametri delle goccioline ottenuti per i casi elencati in precedenza sono presentati nell'appendice B. Come nelle sezioni 4.3 e 4.4 si osserva che gli istogrammi ottenuti assomigliano una distribuzione di probabilità normale e che gli istogrammi dei casi dove è stato misurato un numero maggiore di goccioline si avvicinano di più a questo tipo di distribuzione. Questo conferma il Teorema del Limite Centrale che dice che la distribuzione di una variabile tende a una distribuzione normale con l'aumento del numero di misure di questa variabile. Pertanto si può dire che le misure fatte per ottenere i diametri delle goccioline sono valide.

I diametri medi e gli intervalli di confidenza ottenuti per i casi analizzati sono presentati nella tabella 4.4. La rappresentazione grafica di questi valori è presentata in figura 4.3.

Tabella 4.4: Valori dei diametri medi e degli intervalli di confidenza dei casi utilizzati nell'analisi dell'effetto della velocità del flusso gassoso di ossidante

Caso	Diametro medio (µm)	Intervallo di confidenza (µm)
Standard	4,528	+/- 0,337
U1	4,779	+/- 0,412
U2	4,817	+/- 0,342
U3	4,292	+/- 0,321
U4	4,604	+/- 0,310

Si può osservare in figura 4.3 che il diametro medio delle goccioline create dal fenomeno di *entrainment* tende a diminuire con l'aumento della velocità del flusso gassoso di ossidante. Questo comportamento può essere spiegato con la combinazione dell'equazione (4.6) tratta da [3] che fornisce l'equilibrio della forza di taglio nell'interfaccia tra lo strato liquido di combustibile e il flusso gassoso di ossidante, dell'equazione (4.7) che rappresenta la definizione della pressione dinamica, e dell'equazione (4.8) che rappresenta la definizione della velocità adimensionale utilizzata nella figura 4.3:

$$c_f * P_d = \mu_l \frac{u_l}{h} \quad (4.6)$$

$$P_d = \frac{1}{2} * \rho_g * u_g^2 \quad (4.7)$$

$$u = \frac{u_g}{u_{ref}} \quad (4.8)$$

dove c_f è il coefficiente di attrito, P_d è la pressione dinamica del flusso gassoso (Pa), μ_l è la viscosità del combustibile liquido (mPa*s), u_l è la velocità del combustibile liquido all'interfaccia tra lo strato liquido di combustibile e il flusso gassoso di ossidante (m/s), h è lo spessore dello strato liquido di combustibile (mm), ρ_g è la densità dell'ossidante gassoso (kg/m³), u_g è la velocità reale del flusso gassoso di ossidante (m/s), u è la velocità adimensionale del flusso gassoso di ossidante, e u_{ref} è la velocità di riferimento del flusso gassoso di ossidante (m/s).

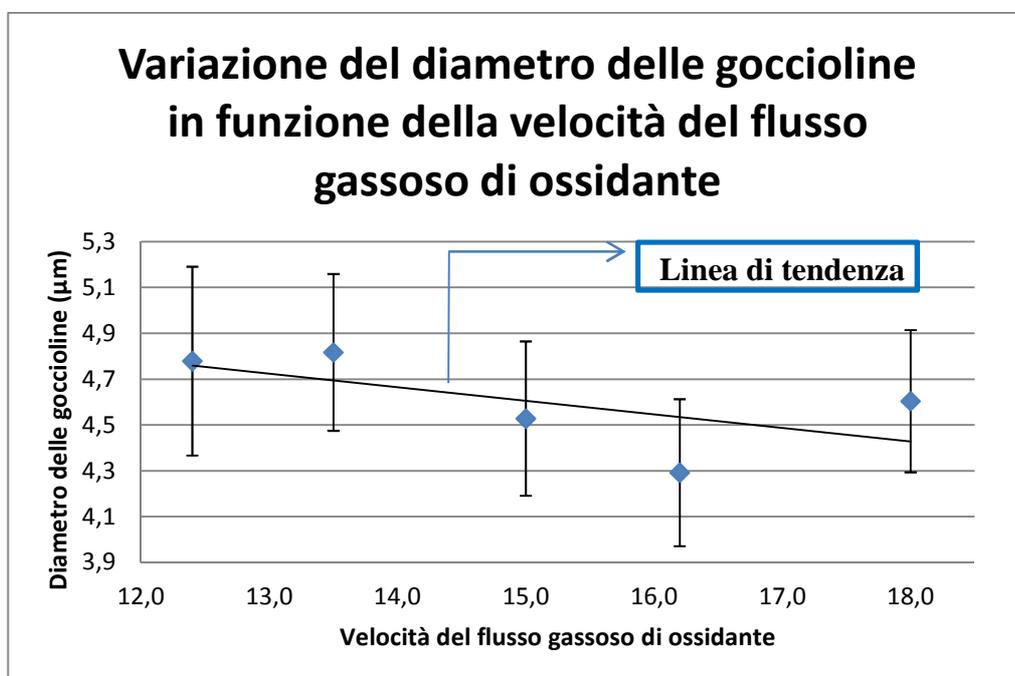


Figura 4.3: Rappresentazione grafica dei diametri medi e degli intervalli di confidenza dei casi utilizzati nell'analisi dell'effetto della velocità del flusso gassoso di ossidante

Come è stato spiegato nel capitolo 3 il programma *Gerris Flow Solver* lavora con variabili adimensionali. Per questo è stato analizzato l'effetto, sul diametro delle goccioline create dal fenomeno di *entrainment*, della velocità adimensionale del flusso gassoso di ossidante, la cui definizione è presentata nell'equazione (4.8).

L'aumento della velocità adimensionale del flusso gassoso di ossidante corrisponde a un aumento della velocità reale del flusso gassoso di ossidante

perché la velocità di riferimento è costante. Pertanto l'aumento della velocità adimensionale provoca un aumento della pressione dinamica del flusso gassoso che aumenta il termine sinistro dell'equazione (4.6), il che significa che la forza di taglio all'interfaccia è maggiore. In altre parole l'aumento della velocità del flusso gassoso di ossidante aumenta la resistenza del combustibile al flusso di ossidante gassoso. Quindi la resistenza delle goccioline al trascinamento è minore quando la velocità del flusso gassoso di ossidante è minore.

Da questo punto in avanti l'analisi è la stessa a quella fatta nelle sezioni 4.3 e 4.4 per la viscosità del combustibile liquido e per lo spessore dello strato liquido di combustibile. Le goccioline di diametro grande hanno una resistenza maggiore al trascinamento perché queste hanno una superficie di contatto maggiore con lo strato liquido di combustibile. Pertanto è necessario ridurre la resistenza dello strato liquido al trascinamento perché le goccioline di diametro grande possano essere trascinate. Siccome la riduzione della velocità del flusso gassoso di ossidante riduce la resistenza delle goccioline al trascinamento, allora le goccioline di diametro grande cominciano ad essere trascinate, il che aumenta il diametro medio delle goccioline generate. Quindi il comportamento osservato in figura 4.3 è corretto.

L'equazione della linea di tendenza presentata in figura 4.3 e il suo coefficiente di correlazione sono presentati in seguito:

$$D = -0,0591 * u + 5,4913 \quad (4.9)$$

$$R^2 = 0,3789 \quad (4.10)$$

dove D è il diametro medio delle goccioline (μm), u è la velocità adimensionale del flusso di ossidante gassoso e R^2 è il coefficiente di correlazione.

Si può osservare che il coefficiente di correlazione è molto inferiore a 0,9, il che significa che rappresentare la variazione del diametro delle goccioline create dal fenomeno di *entrainment* in funzione della velocità del flusso gassoso di ossidante con un modello lineare non è una buona approssimazione. Comunque questo modello può essere utilizzato per mostrare in maniera chiara che il diametro delle goccioline diminuisce con l'aumento della velocità del flusso gassoso di ossidante.

4.6 Effetto del profilo di velocità del flusso gassoso di ossidante

In questa sezione sono presentati e discussi i risultati ottenuti nell'analisi dell'effetto del profilo di velocità del flusso gassoso di ossidante nel diametro delle goccioline create dal fenomeno di *entrainment*. In questa analisi sono stati considerati i casi standard, L, e DR.

Gli istogrammi dei diametri delle goccioline ottenuti per i casi elencati in precedenza sono presentati nell'appendice B. Come nelle sezioni 4.3, 4.4 e 4.5 si osserva che gli istogrammi ottenuti assomigliano una distribuzione di probabilità normale e che gli istogrammi dei casi dove è stato misurato un numero maggiore di goccioline si avvicinano di più a questo tipo di distribuzione. Questo conferma il Teorema del Limite Centrale che dice che la distribuzione di una variabile tende a una distribuzione normale con l'aumento del numero di misure di questa variabile. Pertanto si può dire che le misure fatte per ottenere i diametri delle goccioline sono valide.

I diametri medi e gli intervalli di confidenza ottenuti per i casi analizzati sono presentati nella tabella 4.5. La rappresentazione grafica di questi valori è presentata in figura 4.4.

Tabella 4.5: Valori dei diametri medi e degli intervalli di confidenza dei casi utilizzati nell'analisi dell'effetto del profilo di velocità del flusso gassoso di ossidante

Caso	Diametro medio (μm)	Intervallo di confidenza (μm)
Standard	4,528	+/- 0,337
L	4,797	+/- 0,493
DR	5,210	+/- 0,346

Si può osservare in figura 4.4 che il diametro medio delle goccioline create dal fenomeno di *entrainment* varia molto per i tre profili di velocità del flusso gassoso di ossidante considerati.

Considerando l'ossidante gassoso come un fluido newtoniano la tensione di taglio all'interfaccia tra lo strato liquido di combustibile e il flusso di ossidante gassoso è fornita dalla seguente equazione:

$$\tau_{interfaccia} = \mu_g \frac{\partial u_g}{\partial y} \quad \text{per } y = 0 \quad (4.11)$$

dove $\tau_{interfaccia}$ è la tensione di taglio all'interfaccia tra lo strato liquido di combustibile e il flusso gassoso di ossidante (Pa), μ_g è la viscosità dell'ossidante gassoso (Pa*s), u_g è la velocità del flusso gassoso di ossidante (m/s), e y è la posizione nella direzione normale alla superficie dello strato liquido di combustibile (m).

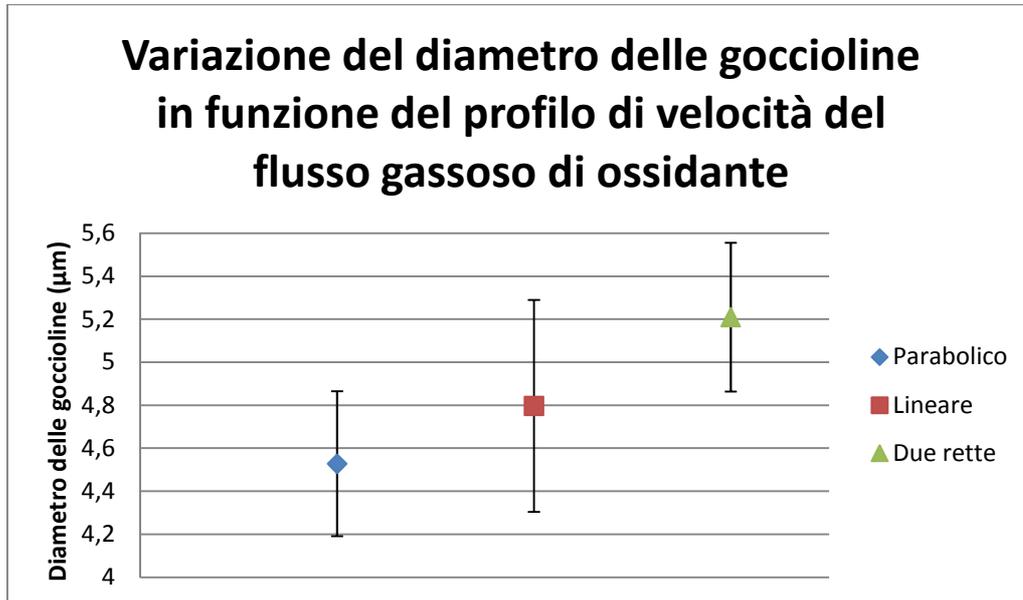


Figura 4.4: Rappresentazione grafica dei diametri medi e degli intervalli di confidenza dei casi utilizzati nell'analisi dell'effetto del profilo di velocità del flusso gassoso di ossidante

Per ogni profilo considerato la derivata dell'equazione (4.11) calcolata nell'interfaccia tra lo strato liquido di combustibile e il flusso gassoso di ossidante è diversa. Pertanto anche la tensione di taglio nell'interfaccia è diversa per ogni profilo. Quindi la resistenza delle goccioline al trascinamento dipende anche dal profilo di velocità del flusso di ossidante gassoso.

Le goccioline di diametro grande hanno una resistenza maggiore al trascinamento perché queste hanno una superficie di contatto maggiore con lo strato liquido di combustibile. Pertanto è necessario ridurre la resistenza dello strato liquido al trascinamento perché le goccioline di diametro grande possano essere trascinate. Siccome il cambiamento del profilo di velocità del flusso gassoso modifica la resistenza delle goccioline al trascinamento, allora le goccioline di diametro grande possono cominciare o no ad essere trascinate dipendendo dal profilo di velocità del flusso gassoso di ossidante, il che cambia il diametro medio delle goccioline generate.

Capitolo 5

Conclusioni e sviluppi futuri

Questa tesi ha avuto come obiettivo l'analisi degli effetti della viscosità del combustibile, dello spessore dello strato liquido di combustibile, della velocità del flusso gassoso di ossidante, e del profilo di velocità del flusso gassoso di ossidante sui diametri delle goccioline create dal fenomeno di *entrainment* in un motore di tipo ibrido. I dati necessari per fare questa analisi sono stati ottenuti via simulazioni numeriche del fenomeno di *entrainment* fatte con il programma *Gerris Flow Solver*.

L'inizio della tesi è stato lo studio del materiale disponibile in letteratura relativo al fenomeno di *entrainment* nella propulsione ibrida. Inoltre è stato necessario studiare il funzionamento del *software* scelto per fare le simulazioni numeriche del fenomeno di *entrainment*.

Con la conoscenza del fenomeno di *entrainment* e del programma *Gerris Flow Solver* è stato possibile creare un codice capace di simulare il fenomeno. In questa maniera sono stati ottenuti i dati necessari relativi ai diametri delle goccioline create dal fenomeno di *entrainment* ed è stato possibile sviluppare l'analisi definita negli obiettivi della tesi.

Come risultato dell'analisi dei dati è stato verificato che il diametro delle goccioline create dal fenomeno di *entrainment* tende a diminuire con l'aumento della viscosità del combustibile e con l'aumento della velocità del flusso gassoso di ossidante, e tende ad aumentare con l'aumento dello spessore dello strato liquido di combustibile. È stato anche osservato che il diametro delle goccioline create dal fenomeno di *entrainment* cambia per diversi profili di velocità del flusso gassoso di ossidante.

Inoltre è stato possibile concludere che la diminuzione del diametro delle goccioline dovuta all'aumento della viscosità del combustibile segue un modello lineare. Tuttavia non è stato possibile trovare modelli che rappresentano bene l'aumento del diametro delle goccioline dovuto all'aumento dello spessore dello strato liquido di combustibile e la diminuzione del diametro delle goccioline dovuta all'aumento della velocità del flusso gassoso di ossidante.

Come sviluppi futuri si suggerisce la validazione via prove sperimentali degli effetti delle viscosità del combustibile, dello spessore dello strato liquido di combustibile, della velocità del flusso gassoso di ossidante e del profilo di velocità del flusso gassoso di ossidante sui diametri delle goccioline create dal fenomeno di *entrainment*. Inoltre si suggerisce l'analisi di casi diversi da quelli considerati in questa tesi per verificare se i risultati trovati possono essere estesi per una gamma maggiore di condizioni di funzionamento. Infine si suggerisce lo

sviluppo di modelli per rappresentare con precisione gli effetti, nei diametri delle goccioline, dei parametri considerati in questa tesi.

Appendice A

In questa appendice è presentato il codice completo sviluppato in questa tesi per simulare il fenomeno di *entrainment* con il programma *Gerris Flow Solver*. Il codice è presentato in grassetto ed alcune spiegazioni sono presentate in corsivo.

Definizione del dominio di simulazione tramite il numero di quadrati ed il numero di legami tra loro

```
8 7 GfsSimulation GfsBox GfsGEdge {} {
```

Definizione delle variabili della simulazione

```
Global {
```

Definizione del diametro della sezione di passaggio del flusso gassoso

```
#define R 3.0
```

Definizione dello spessore dello strato liquido di combustibile

```
#define h 1.0
```

Definizione della densità dell'aria

```
#define rho_air 1.225
```

Definizione della densità della paraffina

```
#define rho_wax 654.4
```

Definizione della relazione tra le densità

```
#define rho(T3) (T3*rho_air + (1.0 - T3)*rho_wax)
```

Definizione della viscosità dell'aria

```
#define mu_air 0.0000178
```

Definizione della viscosità della paraffina

```
#define mu_wax 0.00065
```

Definizione della relazione tra le viscosità

```
#define mu(T3) (T3*mu_air + (1.0 - T3)*mu_wax)
```

Definizione della tensione superficiale della paraffina liquida
#define surface_tension 0.0071

Definizione della velocità del flusso gassoso al centro della sezione di passaggio
#define Ug 15.0

Definizione della velocità del flusso gassoso all'interfaccia tra le due fasi
#define Ugl 0.01*Ug

Definizione della velocità del flusso liquido all'interfaccia tra le due fasi
#define Ulg 0.01*Ugl

Definizione dei parametri che determinano il profilo di velocità del flusso gassoso
#define ag (-4*Ug/(R*R) + 4*Ugl/(R*R))
#define bg (8*Ug/R - 8*Ugl/R)
#define cg (-3*Ug + 4*Ugl)

Definizione dei parametri che determinano il profilo di velocità del flusso liquido
#define al (Ulg/h)
#define bl (-Ulg*R/(2*h) + Ulg)

}

Definizione dei lati dei quadrati che formano il dominio di simulazione
PhysicalParams { L = R }

Definizione del tempo finale di simulazione
Time { end = 3.75 }

Definizione della raffinatezza iniziale
Refine 6

Definizione delle condizioni iniziali
Init { start = 0 } {
 U = (y > (R/2) ? (ag*y*y + bg*y + cg) : (al*y + bl))
 V = 0
}

Definizione della posizione del solido rettangolare
Solid ($y - R/2 + h$)

Implementazione del combustibile come un tracciante
VariableTracerVOF T3

Definizione della condizione iniziale della separazione tra il combustibile e l'ossidante
InitFraction T3 ($y - R/2$)

Implementazione di una raffinatezza adattabile all'interfaccia tra le due fasi
AdaptFunction { **istep = 1** } { **maxlevel = 9** } (**T3 > 0** && **T3 < 1**)

Definizione della curvatura media della curva di separazione tra il combustibile e l'ossidante
VariableCurvature K3 T3

Implementazione della tensione superficiale
SourceTension T3 surface_tension K3

Implementazione delle viscosità
SourceViscosity mu(T3)

Implementazione delle densità
PhysicalParams { **alpha = 1.0/rho(T3)** }

Presentazione del tempo di simulazione a ogni passo
OutputTime { **istep = 1** } **stdout**

Definizione della risposta come un filmato formato dalle immagini del dominio di simulazione ottenute ogni 0,005 secondi
OutputPPM { **step = 0.005** } { **ppm2mpeg > T3.mpg** } { **v = T3** }

}

Definizione delle condizioni al contorno per ogni quadrato che forma il dominio di simulazione

GfsBox {
 left = Boundary {
 BcDirichlet U ($a1*y + b1$)
 BcDirichlet V 0
 }
}

```

        bottom = Boundary {
            BcDirichlet U 0
            BcDirichlet V 0
        }
    }
    GfsBox {
        left = Boundary {
            BcDirichlet U (ag*y*y + bg*y + cg)
            BcDirichlet V 0
        }
        top = Boundary {
            BcDirichlet U 0
            BcDirichlet V 0
        }
    }
    GfsBox {
        bottom = Boundary {
            BcDirichlet U 0
            BcDirichlet V 0
        }
    }
    GfsBox {
        top = Boundary {
            BcDirichlet U 0
            BcDirichlet V 0
        }
    }
    GfsBox {
        bottom = Boundary {
            BcDirichlet U 0
            BcDirichlet V 0
        }
    }
    GfsBox {
        top = Boundary {
            BcDirichlet U 0
            BcDirichlet V 0
        }
    }
    GfsBox {
        right = BoundaryOutflow
        bottom = Boundary {
            BcDirichlet U 0

```

```

        BcDirichlet V 0
    }
}
GfsBox {
    right = BoundaryOutflow
    top = Boundary {
        BcDirichlet U 0
        BcDirichlet V 0
    }
}

```

Definizione della posizione dei quadrati che formano il dominio di simulazione

```

1 2 top
1 3 right
2 4 right
3 5 right
4 6 right
5 7 right
6 8 right

```


Appendice B

In questa appendice sono presentati gli istogrammi ottenuti nell'analisi statistica dei diametri misurati delle goccioline create dal fenomeno di *entrainment* nelle simulazioni.

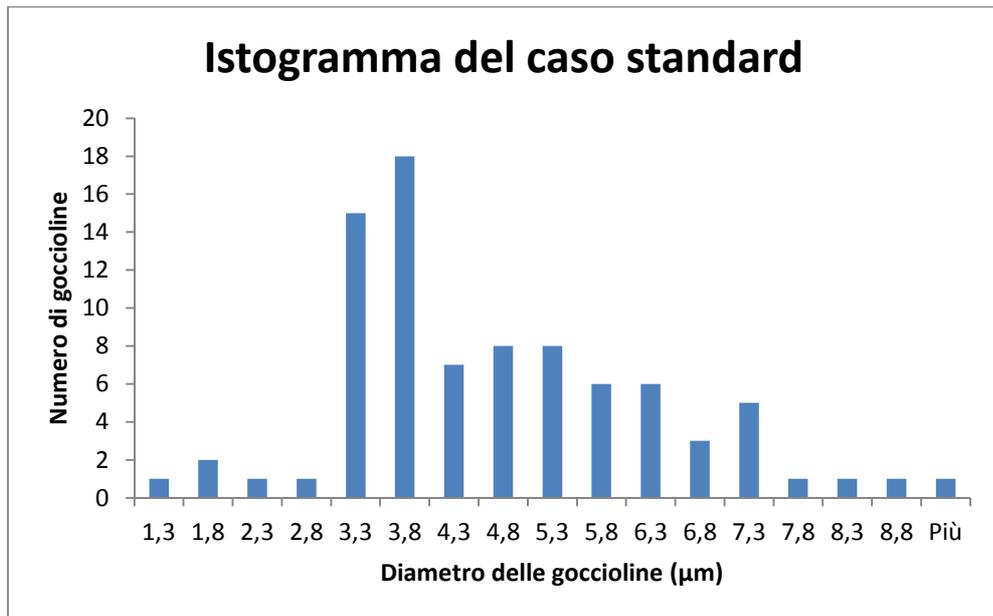


Figura B.1: Istogramma dei diametri delle goccioline del caso standard

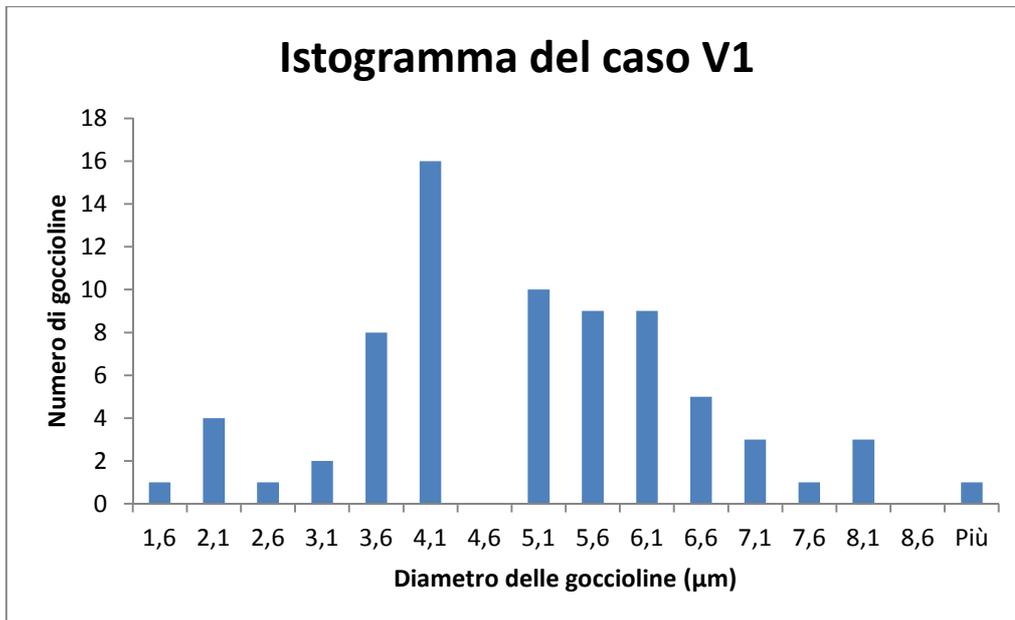


Figura B.2: Istogramma dei diametri delle goccioline del caso V1

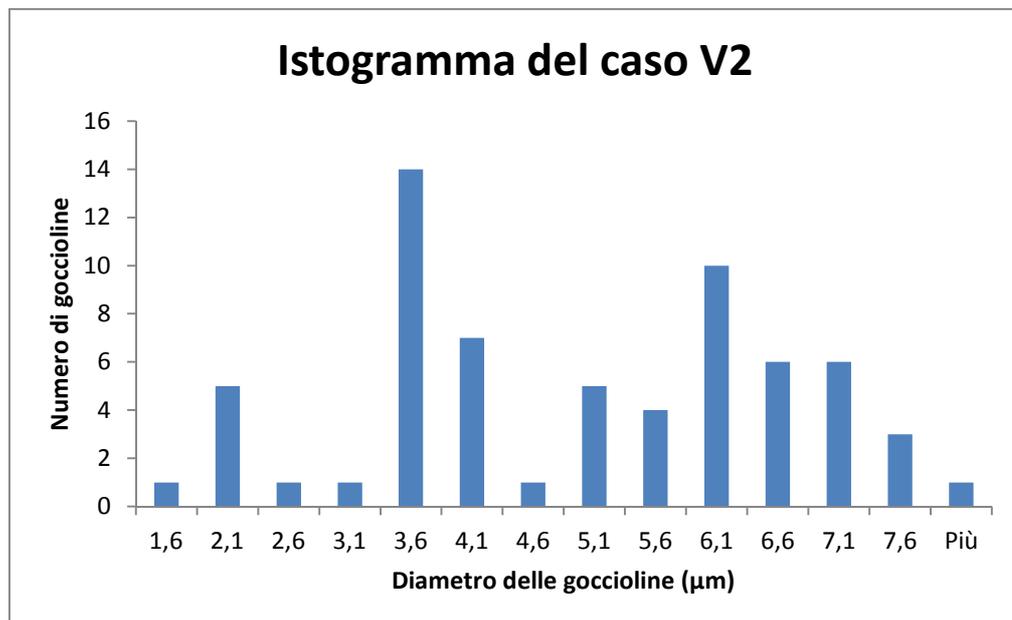


Figura B.3: Istogramma dei diametri delle goccioline del caso V2

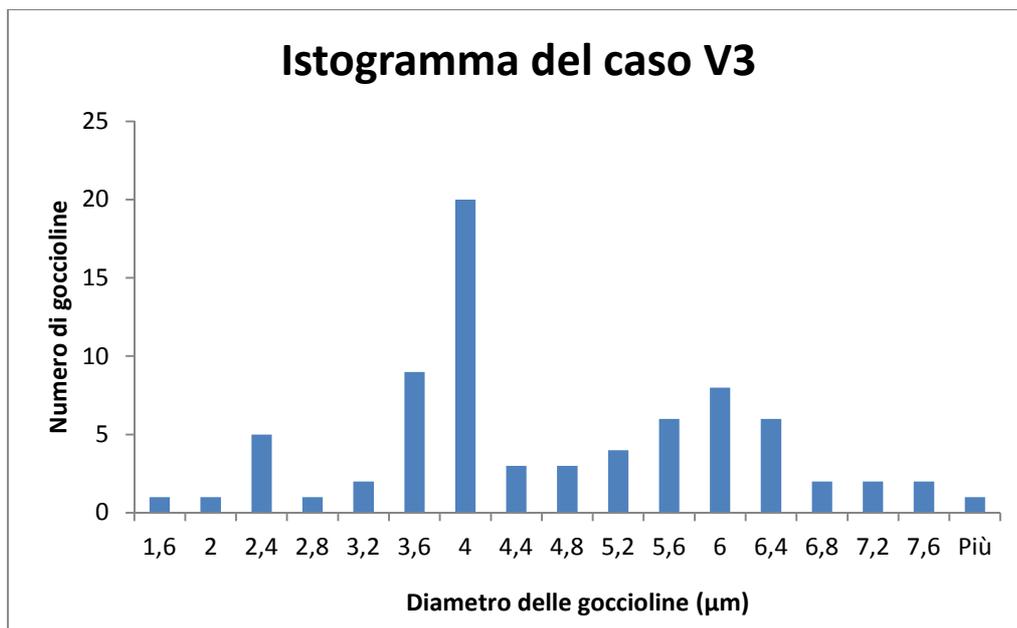


Figura B.4: Istogramma dei diametri delle goccioline del caso V3

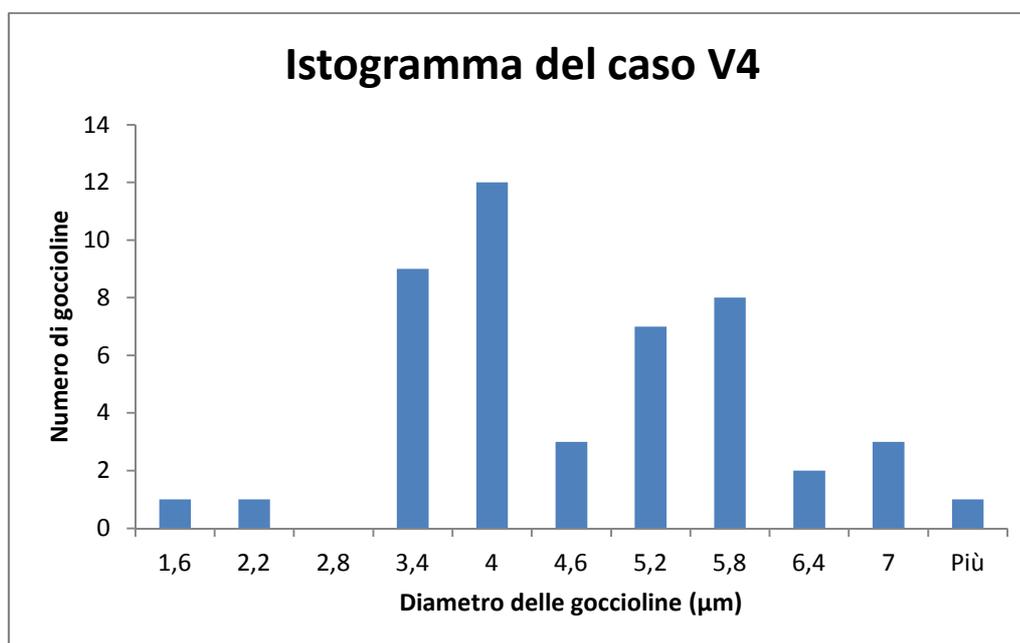


Figura B.5: Istogramma dei diametri delle goccioline del caso V4

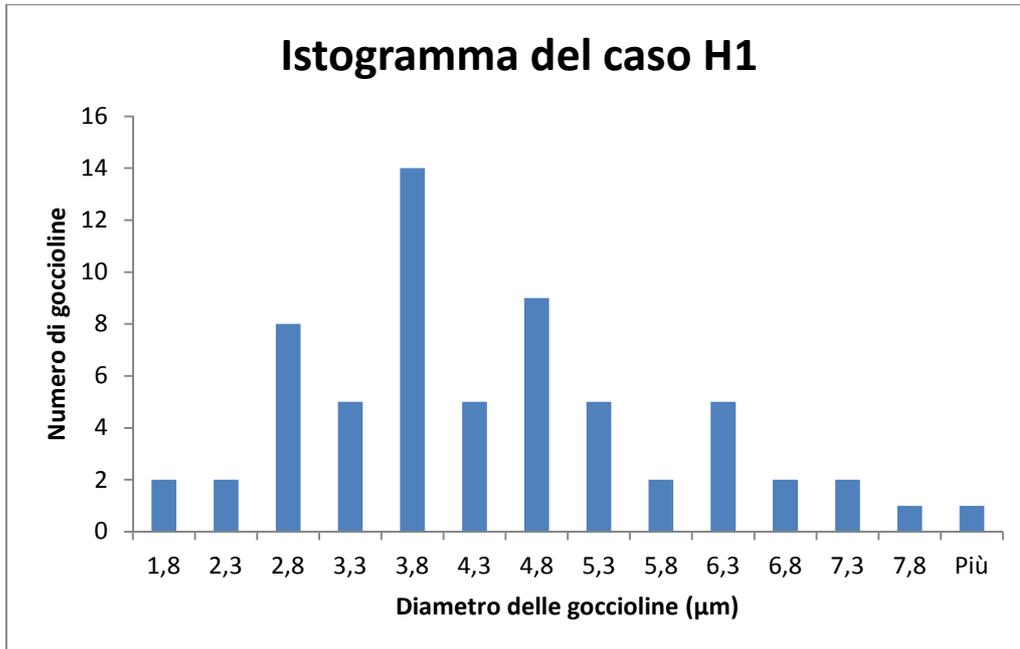


Figura B.6: Istogramma dei diametri delle goccioline del caso H1

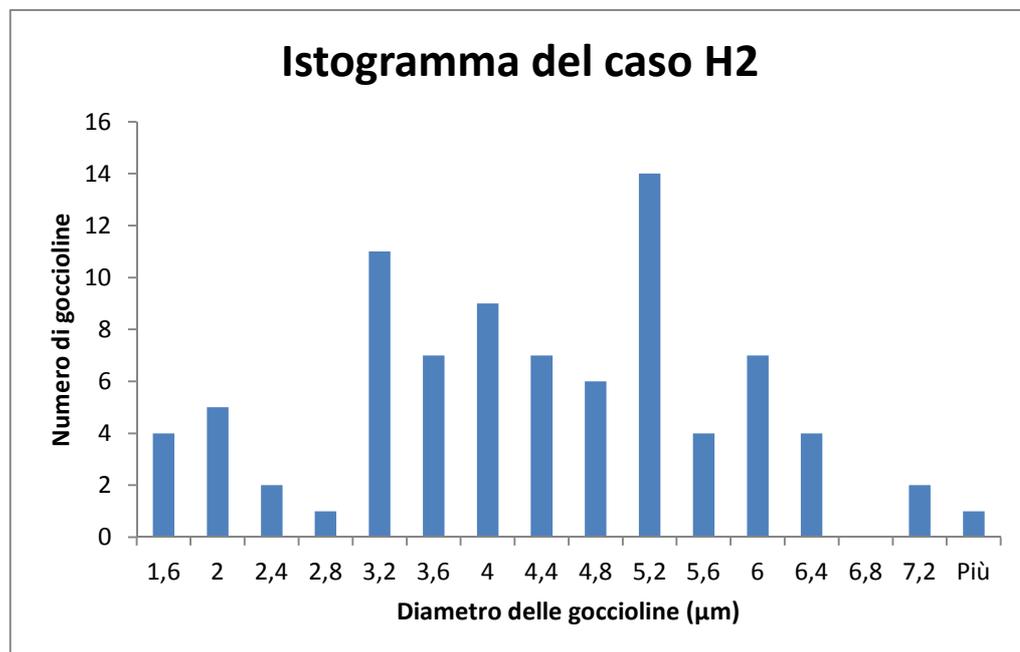


Figura B.7: Istogramma dei diametri delle goccioline del caso H2

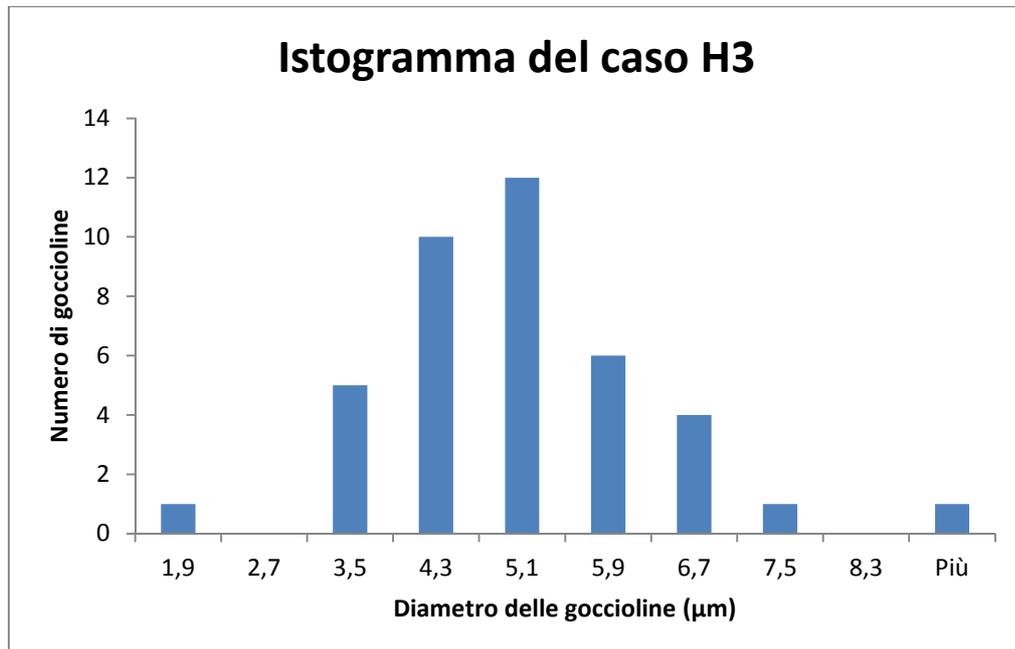


Figura B.8: Istogramma dei diametri delle goccioline del caso H3

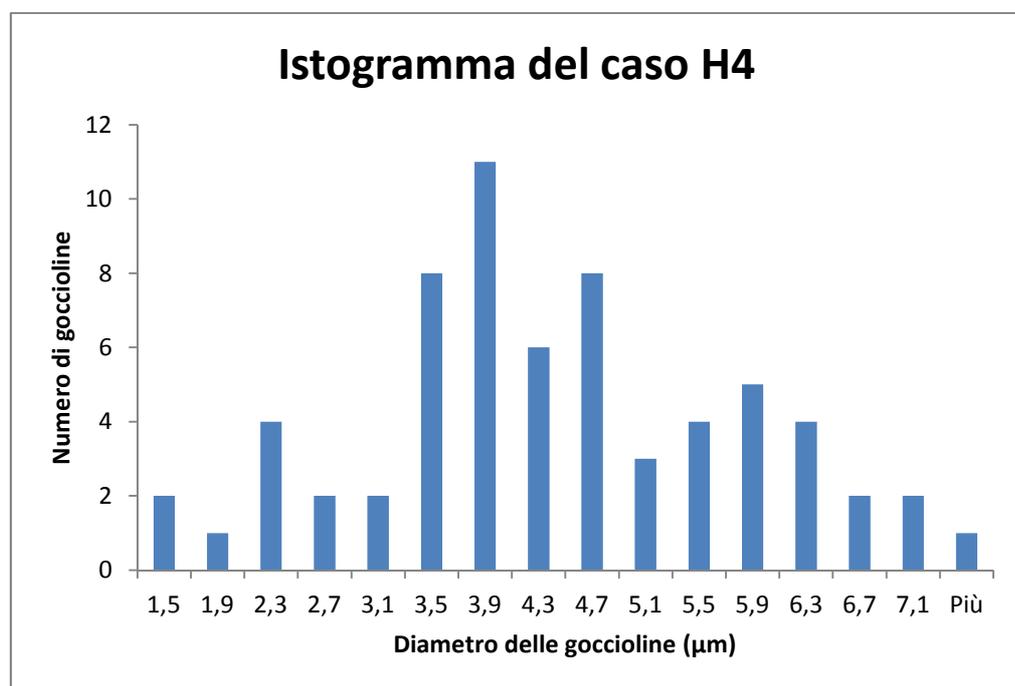


Figura B.9: Istogramma dei diametri delle goccioline del caso H4

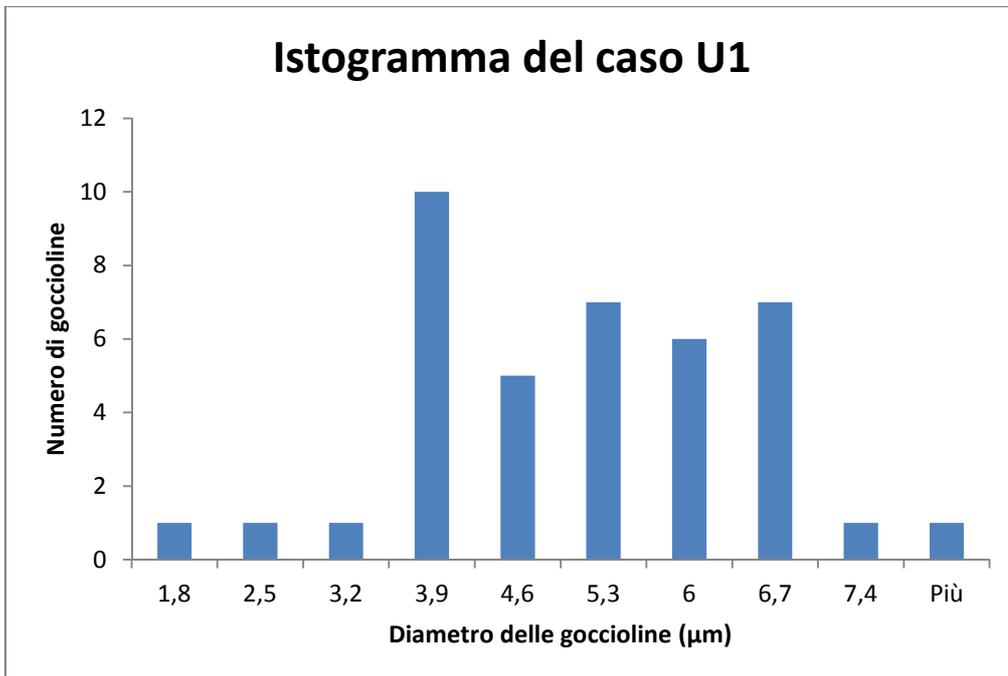


Figura B.10: Istogramma dei diametri delle goccioline del caso U1

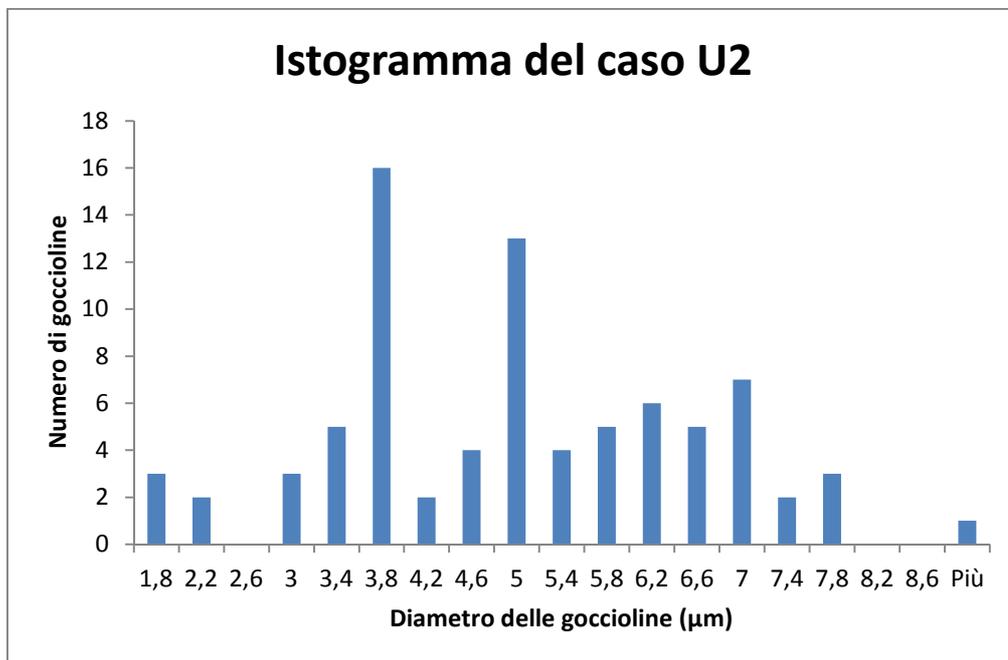


Figura B.11: Istogramma dei diametri delle goccioline del caso U2

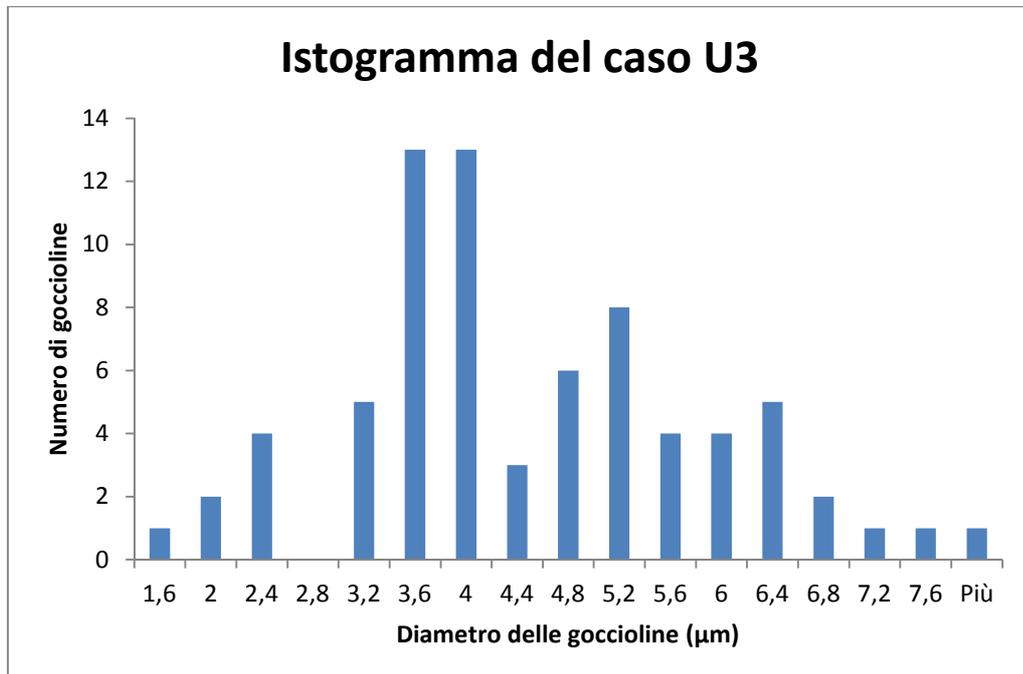


Figura B.12: Istogramma dei diametri delle goccioline del caso U3

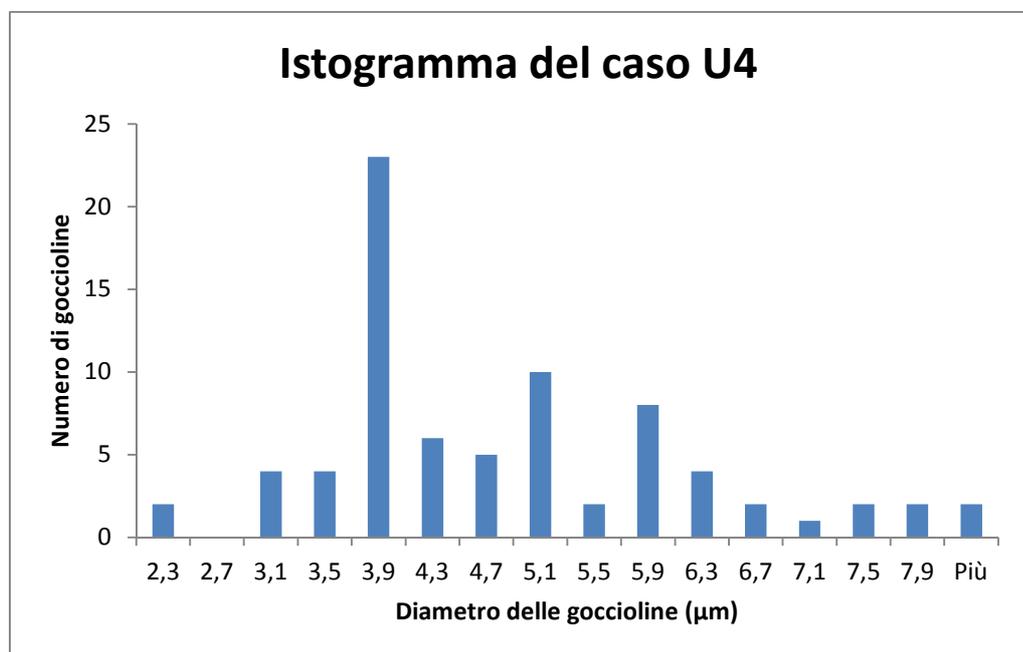


Figura B.13: Istogramma dei diametri delle goccioline del caso U4

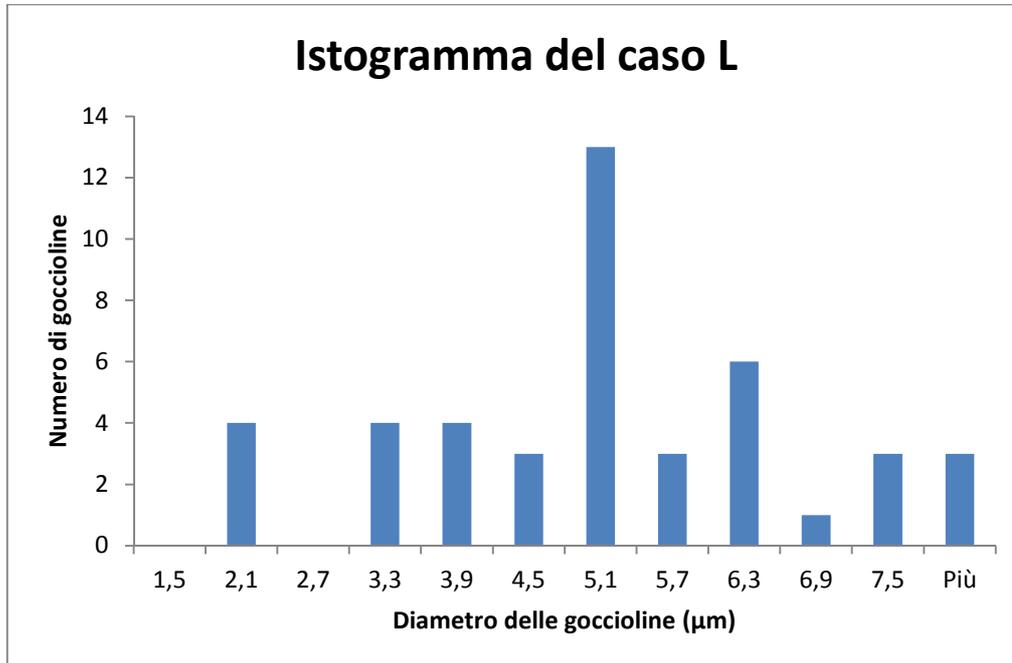


Figura B.14: Istogramma dei diametri delle goccioline del caso L

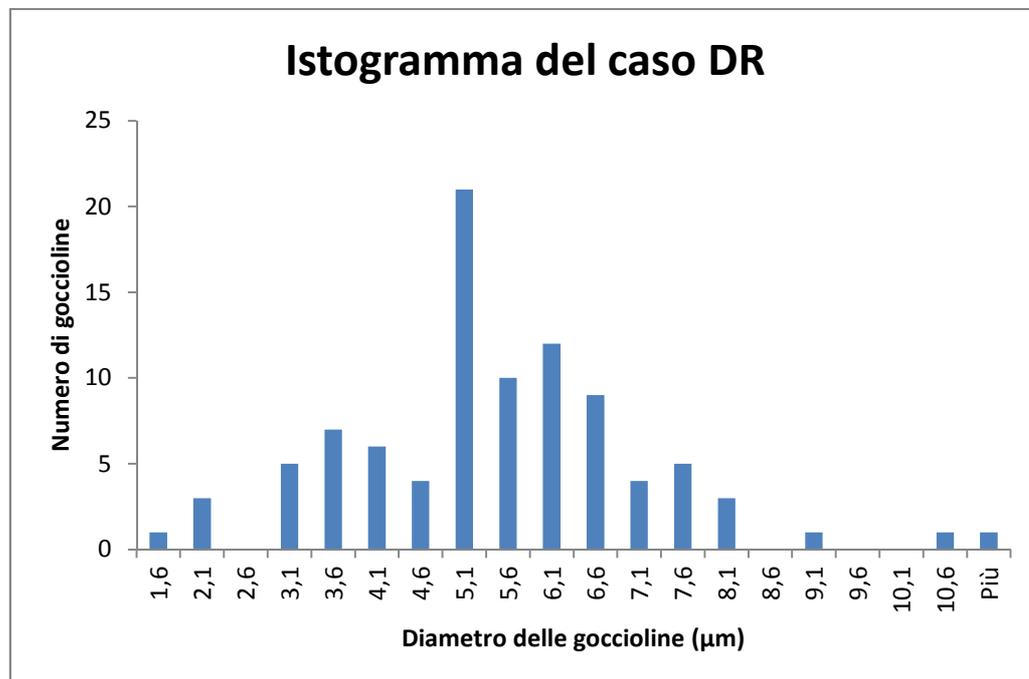


Figura B.15: Istogramma dei diametri delle goccioline del caso DR

Riferimenti

[1] DE LUCA, L.T., Endoreattori a Propellente Ibrido. Problemi Energetici in Propulsione Aerospaziale: Appunti per Studenti. Cap. 12.

[2] FRANCHI, F., Studio della Stabilità del Film Liquido in Combustibili Paraffinici per Applicazioni Propulsive Aerospaziali. Tesi di Laurea Specialistica, Politecnico di Milano, 2009, Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale.

[3] KARABEYOGLU, M. A., ALTMAN, D., CANTWELL, B. J., Combustion of Liquefying Hybrid Propellants: Part 1, General Theory. *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 18, No. 3, pp. 610-620, maggio/giugno 2002.

[4] KARABEYOGLU, M. A., CANTWELL, B. J., Combustion of Liquefying Hybrid Propellants: Part 2, Stability of Liquid Films. *Journal of Propulsion and Power*, v. 18, n. 3, p. 621-630, maggio/giugno 2002.

[5] POPINET, S., Gerris_logo.png. Disponibile in: <http://gfs.sourceforge.net/wiki/images/4/40/Gerris_logo.png>.

[6] POPINET, S., Atomisation.gfs. Disponibile in: <<http://gfs.sourceforge.net/examples/examples/atomisation/atomisation.gfs>>.

[7] POPINET, S., Gerris Flow Solver. Disponibile in: <http://gfs.sourceforge.net/wiki/index.php/Main_Page>.

[8] POPINET, S., Tutorial.pdf. Disponibile in: <<http://gfs.sourceforge.net/tutorial/tutorial.pdf>>.

[9] POPINET, S., Gerris Examples. Disponibile in: <<http://gfs.sourceforge.net/examples/examples/>>.

[10] POPINET, S., Gerris FAQ. Disponibile in: <<http://gfs.sourceforge.net/wiki/index.php/FAQ>>.

[11] POPINET, S., Gerris Object Hierarchy. Disponibile in: <http://gfs.sourceforge.net/wiki/index.php/Object_hierarchy>.