

Scuola di Ingegneria e Architettura

Corso di Laurea in Ingegneria Energetica

Dipartimento di Ingegneria Industriale

Tesi di Laurea in Macchine T

VALIDAZIONE DEL MODELLO DI FILM  
FLUIDO IMPLEMENTATO IN  
OPENFOAM

Candidato:  
Giulia Laghi

Relatore:  
Prof. Ing. Giulio Cazzoli



*Alla mia famiglia*



*Il faut être léger comme l'oiseau,  
et non comme la plume.*

[PAUL VALÉRY]



# Sommario

Le prestazioni dei motori a combustione interna sono fortemente influenzate dalla formazione di un film fluido, a seguito dell'impatto di uno spray con una parete. Nell'ottica di favorire la formazione della miscela e di ridurre le emissioni, lo studio approfondito di tale fenomeno deve essere supportato da un processo di simulazione assistita dal calcolatore. Pertanto, la Fluidodinamica Computazionale (*Computational Fluid Dynamics*, CFD) ed i modelli ad essa associati rappresentano al giorno d'oggi uno strumento vantaggioso e sempre più utilizzato.

In questo ambito si colloca il presente lavoro di tesi, che si propone di validare il modello di film fluido implementato nel software OpenFOAM-2.3.0, confrontando i risultati ottenuti, in termini di altezza del film fluido, con quelli del caso sperimentale di Le Coz et al.



# Indice

<b>Sommario</b>	<b>i</b>
<b>1 Il film fluido</b>	<b>1</b>
1.1 Introduzione al problema . . . . .	1
1.2 Interazione spray impattante-film . . . . .	2
1.2.1 Stick . . . . .	3
1.2.2 Rebound . . . . .	4
1.2.3 Spread . . . . .	5
1.2.4 Splash . . . . .	6
1.3 Le equazioni del film fluido . . . . .	7
1.3.1 Equazione di conservazione della massa . . . . .	8
1.3.2 Equazione di bilancio della quantità di moto . . . . .	9
1.3.3 Equazione di conservazione dell'energia . . . . .	10
<b>2 La fluidodinamica computazionale</b>	<b>11</b>
2.1 Introduzione alla CFD . . . . .	11
2.2 Il software OpenFOAM . . . . .	11
2.3 Il solutore <code>reactingParcelFilmFoam</code> . . . . .	12
2.3.1 La cartella <i>constant</i> . . . . .	14
2.3.2 La cartella <i>system</i> . . . . .	16
2.3.3 La cartella <i>0</i> . . . . .	16
<b>3 La struttura del caso di tesi</b>	<b>17</b>
3.1 Il caso sperimentale . . . . .	17
3.2 La creazione della griglia . . . . .	18
3.2.1 La creazione della regione del film fluido . . . . .	20
3.3 Il set-up del dizionario <code>reactingCloudProperties</code> . . . . .	21

3.4	Le condizioni al contorno . . . . .	23
3.5	Il dizionario <code>controlDict</code> . . . . .	24
<b>4</b>	<b>L'analisi dei risultati</b>	<b>27</b>
4.1	L'analisi qualitativa . . . . .	27
4.2	L'analisi quantitativa . . . . .	30
4.2.1	L'andamento dell'altezza del film su 450 ms . . . . .	30
4.2.2	Il confronto con i dati sperimentali . . . . .	32
4.3	Effetto della densità di griglia . . . . .	34
<b>5</b>	<b>Conclusioni e sviluppi futuri</b>	<b>37</b>
<b>A</b>	<b>Avviare le applicazioni</b>	<b>39</b>
<b>B</b>	<b>Listati e utilities</b>	<b>41</b>
B.1	<code>blockMeshDict</code> . . . . .	41
B.2	<code>topoSetDict</code> . . . . .	44
B.3	<code>extrudeToRegionMeshDict</code> . . . . .	47
B.4	<code>reactingCloudProperties</code> . . . . .	48
B.5	L'utility <code>sample</code> . . . . .	54
B.6	Parti del <code>blockMeshDict</code> modificate . . . . .	55
B.6.1	Griglia rada . . . . .	55
B.6.2	Griglia fitta . . . . .	55
	<b>Bibliografia</b>	<b>57</b>

# Elenco delle figure

1.1	Forze a cui è sottoposto il film fluido . . . . .	2
1.2	Regimi di impatto spray-film . . . . .	3
1.3	Schematizzazione del fenomeno del rebound . . . . .	4
1.4	Schematizzazione del fenomeno dello splash . . . . .	6
1.5	Volume di controllo . . . . .	7
2.1	La struttura di OpenFOAM . . . . .	12
3.1	Schema del caso . . . . .	18
3.2	Sezione del condotto . . . . .	19
3.3	Visuale intera del condotto . . . . .	19
3.4	Scomposizione del vettore accelerazione di gravità . . . . .	20
3.5	Profili di iniezione su una durata di 25 ms . . . . .	21
3.6	Profilo di iniezione complessivo . . . . .	22
3.7	Sezioni di ingresso e uscita del condotto . . . . .	24
4.1	Evoluzione del film fluido ai primissimi istanti temporali . . . . .	27
4.2	Evoluzione del film fluido a differenti istanti temporali . . . . .	28
4.3	Distribuzione dei sensori . . . . .	30
4.4	Andamento altezza film al sensore 4 . . . . .	31
4.5	Andamento altezza film al sensore 5 . . . . .	31
4.6	Confronto Sperimentale - OpenFOAM al sensore 4 . . . . .	32
4.7	Confronto tra diversi periodi al sensore 4 . . . . .	33
4.8	Confronto Sperimentale - OpenFOAM al sensore 5 . . . . .	33
4.9	Confronto tra griglie al sensore 4 . . . . .	35
4.10	Confronto tra griglie al sensore 5 . . . . .	35
4.11	Confronto tra griglia base e griglia fitta a 300 ms . . . . .	36



# Elenco delle tabelle

3.1	Condizioni operative . . . . .	18
-----	--------------------------------	----



# Introduzione

La Fluidodinamica Computazionale rappresenta al giorno d'oggi uno strumento sempre più utilizzato in numerose applicazioni industriali basate sul moto dei fluidi. In particolare, poiché i motori a combustione interna sono macchine complesse al cui interno viene elaborato un fluido, la CFD costituisce uno strumento irrinunciabile per le maggiori case produttrici di autoveicoli, il cui obiettivo è il conseguimento di elevate prestazioni e ridotte emissioni inquinanti. Proponendosi come valida alternativa all'approccio tradizionale di tipo empirico, la CFD offre, infatti, il vantaggio di studiare sistemi difficilmente osservabili e prevedibili, testando diverse configurazioni attraverso la variazione di un solo parametro significativo alla volta, riducendo sensibilmente i tempi e i costi di progettazione.

È in quest'ottica che si colloca il nuovo modo di concepire la ricerca e lo sviluppo dei motori del futuro, che vede lo studio approfondito dei fenomeni all'interno del motore supportato da un processo simbiotico di sperimentazione e simulazione assistita con il calcolatore. Da qui nasce l'opportunità di sfruttare modelli, che, grazie agli strumenti della CFD, siano di supporto nel comprendere e nello studiare fenomeni fluidodinamici legati a problematiche di rilevanza. Tali modelli, per poter essere utilizzati in modo affidabile, richiedono di essere validati. Il presente lavoro di tesi si inserisce in questo ambito, con l'obiettivo di validare il modello di film fluido implementato nel software OpenFOAM 2.3.0, sulla base di un confronto con il caso sperimentale di Le Coz et al.

L'elaborato si compone di cinque capitoli fondamentali. Nel primo capitolo vengono analizzate l'interazione spray impattante-film e le equazioni che governano il film fluido. Il secondo capitolo è dedicato alla descrizione della CFD e delle sue caratteristiche, ponendo particolare attenzione al software OpenFOAM ed ai dizionari che esso propone. Nel terzo capitolo viene presentata la struttura del caso di studio utilizzato per validare il software nell'ambito del comportamento del film fluido. Il quarto capitolo fornisce l'analisi qualitativa e quantitativa dei risultati. Il quinto ed

---

ultimo capitolo presenta le conclusioni tratte da questo lavoro di tesi e gli eventuali sviluppi futuri.

# Capitolo 1

## Il film fluido

### 1.1 Introduzione al problema

L'impatto di uno spray con la parete e la conseguente formazione di un film fluido influenzano in maniera consistente le prestazioni dei motori a combustione interna. La maggior parte dei combustibili utilizzati in questi motori richiede di evaporare e successivamente miscelarsi con la carica di gas comburente allo scopo di bruciare, espandere e produrre lavoro. Per raggiungere le condizioni di miscela aria-combustibile desiderate, tali combustibili vengono iniettati sotto forma di spray nel condotto di aspirazione o nella precamera, nel caso di motori a iniezione indiretta (PFI, *Port Fuel Injection*), o direttamente nel cilindro, nel caso di motori a iniezione diretta (GDI, *Gasoline Direct Injection*). In generale, lo spray può impattare le superfici del motore prima che l'evaporazione e la miscela siano completate.

Il fenomeno del *wall wetting* e l'accumulo di liquido a parete causano un aumento delle emissioni di idrocarburi incombusti nei motori ad accensione comandata (motori a ciclo otto) ed una maggiore produzione di particolato nei motori ad accensione per compressione (motori a ciclo diesel). In particolare, è bene tenere sotto controllo le interazioni spray-parete dei motori diesel con piccolo alesaggio, dove la ridotta distanza tra pistone e parete rende molto probabile l'impatto, o con bassa pressione di iniezione.

## 1.2 Interazione spray impattante-film

Quando lo spray di combustibile impatta sulla parete, un certo numero di gocce si accumula sulla superficie stessa, dando origine ad un film liquido in continua crescita per l'arrivo di nuove particelle. Sulla base dell'energia cinetica posseduta dalle gocce impattanti e del tipo di forze in gioco, possono avere luogo diversi meccanismi di interazione (*impingement*), che modificano l'interfaccia della superficie fluida creata. In tutti i casi, il film liquido scambia calore con le pareti solide e con l'aria circostante, evaporando in parte e miscelandosi con il gas presente nel cilindro. Tale film si trova, inoltre, sottoposto a trasporto grazie all'azione di:

- forze di taglio sulla superficie dovute al moto del gas;
- forze volumetriche dovute all'accelerazione del pistone ed alla forza di gravità;
- variazione di quantità di moto dovuta all'interazione con le gocce impattanti.

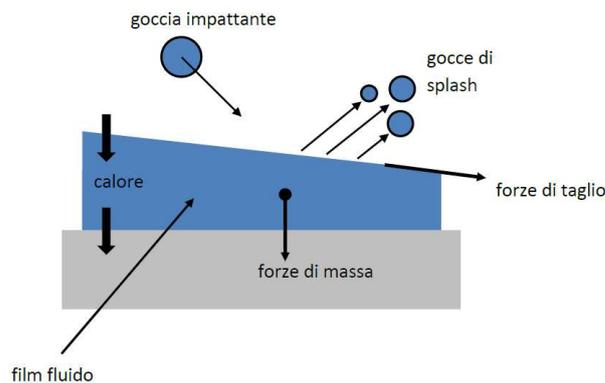


Figura 1.1. Forze a cui è sottoposto il film fluido

È possibile distinguere quattro diversi regimi di impatto che si verificano tra lo spray e il film fluido. Il parametro che viene adottato come discriminante tra i diversi regimi è il numero di Weber, così definito:

$$We = \frac{\rho d_d U_{nd}^2}{\sigma} \quad (1.1)$$

dove

$\rho$ : densità del fluido

$d_d$ : diametro delle particelle

$U_{nd}$ : velocità relativa normale delle particelle rispetto alla superficie

$\sigma$ : tensione superficiale.

Come si può notare, il numeratore risulta proporzionale all'energia cinetica che la particella è in grado di trasmettere nell'urto (tramite la velocità  $U_{nd}$ ), mentre il denominatore è proporzionale all'energia di superficie posseduta dalla goccia. È proprio dall'influenza relativa di questi due fattori che derivano le differenti manifestazioni che caratterizzano i vari regimi.

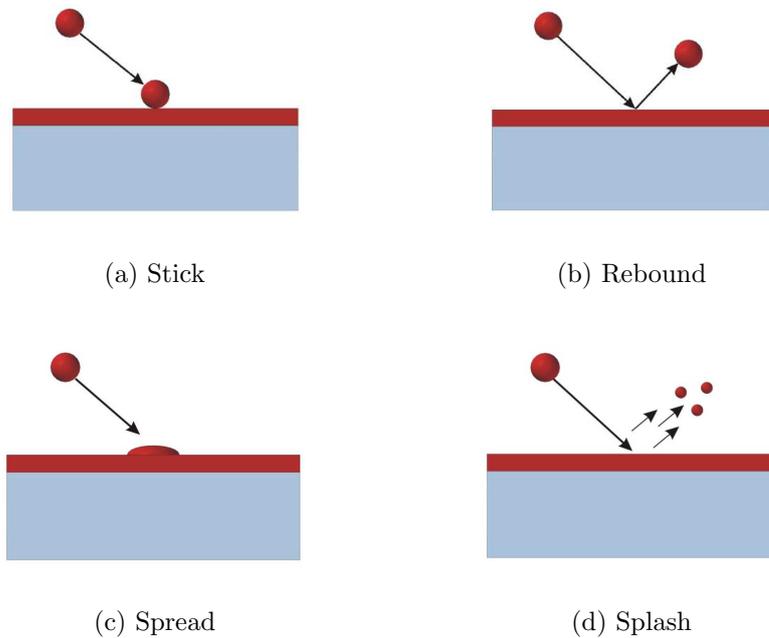


Figura 1.2. Regimi di impatto spray-film

### 1.2.1 Stick

Si verifica con energie di impatto molto basse e con numeri di Weber inferiori a 5.

$$We \leq 5 \tag{1.2}$$

La goccia raggiunge il film ma non ha energia sufficiente per entrare in esso, né tanto meno per cambiare forma e creare una nuova superficie in modo da spargersi su di esso (figura 1.2a). La particella raggiunge, infatti, la parete e resta attaccata ad essa senza cambiare forma.

### 1.2.2 Rebound

Si verifica con numeri di Weber compresi tra 5 e 10.

$$5 < We \leq 10 \quad (1.3)$$

L'energia di impatto inizia ad essere consistente, ma non ancora abbastanza elevata da permettere alla goccia di immergersi. La particella, quindi, rimbalza sul film liquido (figura 1.2b). Per una completa valutazione del regime di rimbalzo occorre determinare le componenti di velocità e la direzione di uscita della goccia impattante in funzione dei parametri iniziali.

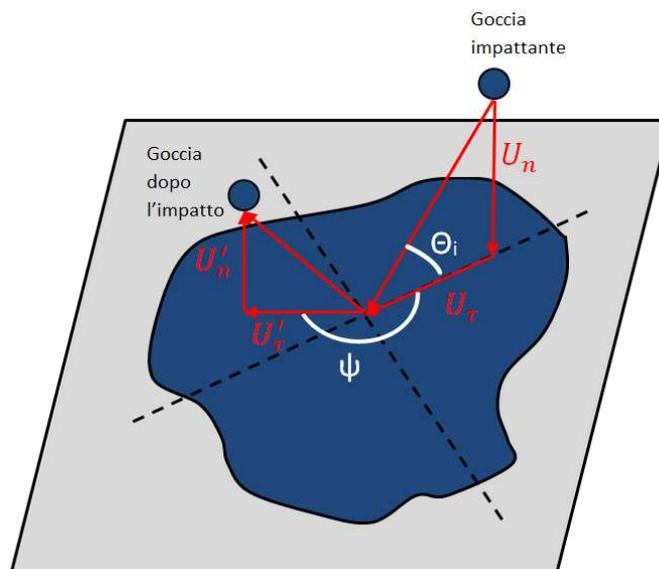


Figura 1.3. Schematizzazione del fenomeno del rebound

In figura 1.3 si sono indicate con  $U_n$  e  $U_\tau$  le componenti di velocità in direzione rispettivamente normale e tangenziale della goccia rispetto al piano del film e con  $U'_n$  e  $U'_\tau$  le componenti della particella dopo l'impatto. L'angolo  $\psi$ , inoltre, indica

la direzione di uscita della particella rispetto a quella di entrata, poiché nell'urto la goccia può subire una deviazione.

Vi sono relazioni che intercorrono tra parametri di ingresso e uscita per piccole gocce che urtano contro superfici bagnate. Esse sono modellate, secondo il modello di Stanton et al., come alle espressioni (1.4) e (1.5).

$$|U'_\tau| = \frac{5}{7}|U_\tau| \quad (1.4)$$

$$|U'_n| = -e|U_n| \quad (1.5)$$

$e$  è il coefficiente di restituzione, definito come:

$$e = 0,993 - 1,76\Theta_i - 1,56\Theta_i^2 - 0,490\Theta_i^3 \quad (1.6)$$

$\Theta_i$  è l'angolo di incidenza dell'urto misurato a partire dalla superficie della parete, espresso in radianti. Il valore di  $\psi$  viene assunto in modo casuale tra 90 e 270 gradi.

### 1.2.3 Spread

Il regime di spread è simile a quello di stick, ma avviene per numeri di Weber più alti.

$$10 < We \leq 18,0^2 d_d \left(\frac{\rho}{\sigma}\right)^{\frac{1}{2}} \nu^{\frac{1}{4}} f^{\frac{3}{4}} \quad (1.7)$$

dove

$d_d$ : diametro della goccia

$\rho$ : densità del fluido

$\sigma$ : tensione superficiale

$\nu$ : viscosità cinematica

$f$ : frequenza di impatto.

In tale regime, la goccia viene incorporata nel film in seguito all'impatto, in quanto l'energia cinetica che caratterizza l'urto è sufficientemente alta da trasformarsi in energia di superficie (figura 1.2c).

### 1.2.4 Splash

Il fenomeno dello splash si ha con alta energia di impatto. In seguito all'urto della goccia con il film, si forma una corona di liquido instabile che tende a staccarsi formando tante goccioline secondarie (figura 1.2d).

In questo regime devono essere calcolate molte quantità allo scopo di descrivere il processo, tra le quali la porzione di massa della goccia incidente che si deposita nel film e le dimensioni, la velocità e gli angoli di eiezione delle particelle (vedi figura 1.4).

$$18,0^2 d_d \left( \frac{\rho}{\sigma} \right)^{\frac{1}{2}} \nu^{\frac{1}{4}} f^{\frac{3}{4}} < We \quad (1.8)$$

Per calcolare il valore limite di Weber che contraddistingue il regime di splash, occorre determinare la frequenza di impatto  $f$  per ogni particella computazionale: essa è calcolata come l'inverso del tempo che intercorre tra due impatti. Il valore di  $f$  per la prima goccia che urta il film può essere ambiguo e viene così calcolato:

$$f = \frac{U_n}{d_d} \quad (1.9)$$

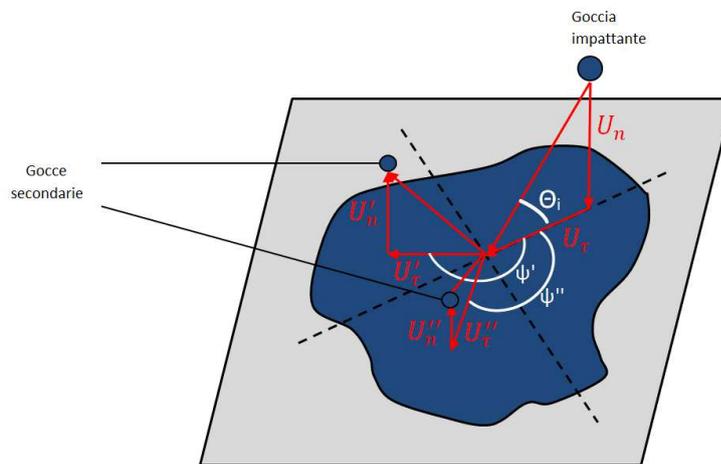


Figura 1.4. Schematizzazione del fenomeno dello splash

## 1.3 Le equazioni del film fluido

Le equazioni che governano l'evoluzione del film fluido a parete derivano dalle classiche equazioni di conservazione della massa, dell'energia e dal bilancio di quantità di moto. È inoltre possibile aggiungere alcune ipotesi, validate da numerose rilevazioni sperimentali, che consentono di semplificare il modello:

- fluido newtoniano
- fluido incomprimibile
- moto laminare
- film sottile.

L'ipotesi di moto laminare nasce da una osservazione sperimentale a cura di Bai et al., secondo cui il film nei motori diesel non supera mai i  $400 \mu m$  di spessore ed è pertanto ragionevole ipotizzare di trovarsi all'interno dello strato limite dinamico.

Per una corretta integrazione delle equazioni del film fluido, è necessario discretizzare il dominio di definizione e definire un volume di controllo (approccio euleriano), come quello di figura 1.5.

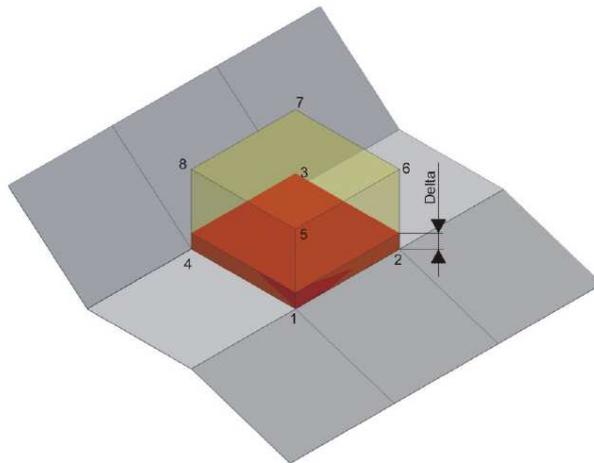


Figura 1.5. Volume di controllo

Il volume di controllo su OpenFOAM è costituito dallo strato di celle che forma la regione del film fluido (di cui si parlerà in seguito).

Nella fase di discretizzazione, i valori di tutte le grandezze, sia scalari che vettoriali, vengono assegnati al centro della cella. Localmente il film fluido è rappresentato da un modello di equazioni bidimensionale, ma per il particolare volume di controllo definito, le equazioni sono quelle di un fluido con una ‘virtuale’ comprimibilità. La cella di riferimento ha, infatti, un’altezza superiore allo spessore del film e quindi la variazione di  $\delta$  (spessore del film o altezza del film) non è altro che la variazione della massa presente nel volume. È possibile, dunque, paragonare formalmente la variabile  $\delta$  alla densità del fluido presente nella cella, ricordandoci però di non vincolare la variabile in questione con la pressione, come invece andrebbe fatto per un fluido comprimibile reale.

Sulla base delle condizioni al contorno imposte, è inoltre possibile sapere come varia la velocità del film fluido  $U_f$  e la sua temperatura  $T_f$ .

Nell’espressione delle equazioni del film fluido, è ovviamente necessario tener conto dell’effetto provocato dall’impatto delle gocce attraverso l’introduzione di opportuni termini sorgente. Le equazioni di conservazione che verranno illustrate nei prossimi paragrafi sono generiche e valgono, a livello qualitativo, per qualunque meccanismo di impingement.

### 1.3.1 Equazione di conservazione della massa

La variazione nel tempo della massa di liquido contenuta nel film, sommata al flusso netto attraverso le superfici di controllo della cella, è pari a due termini sorgente. Essi tengono conto del contributo dovuto all’impatto delle gocce dello spray ( $S_m^d$ ) e all’evaporazione a seguito dello scambio termico con la parete solida ( $S_m^v$ ):

$$\frac{\partial \rho \delta}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \delta \mathbf{u}) = S_m^d + S_m^v \quad (1.10)$$

Il termine  $S_m^d$  dipende da quale meccanismo di interazione avviene tra getto e parete. Infatti, se le velocità di impatto sono basse (spread), tutta la massa delle gocce contribuisce ad aumentare lo spessore di film, mentre se le velocità di impatto sono elevate (splash), solo una parte rimane immersa nel liquido a parete. Se le particelle rimbalzano, non si ha nessun contributo in massa.

### 1.3.2 Equazione di bilancio della quantità di moto

Il tasso di variazione nel tempo della quantità di moto associata al film fluido, espresso attraverso la derivata sostanziale, eguaglia la risultante dei contributi esterni:

$$\frac{\partial(\rho\delta\mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\delta\mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = \mathbf{S}_u^n + \mathbf{S}_u^t + \mathbf{S}_u^m + \mathbf{F}_{vol} + \mathbf{F}_\tau \quad (1.11)$$

Analizzando singolarmente i termini presenti a secondo membro, si osserva che:

- $\mathbf{S}_u^n$  tiene conto dei gradienti di pressione che possono nascere all'interno del film. Esso può essere espresso come la somma della pressione idrostatica  $p_h$ , della pressione di impatto delle gocce in direzione normale alla superficie  $p_d$ , della pressione esercitata dall'aria circostante  $p_g$  e delle forze di capillarità  $p_\sigma$ :

$$p_L = p_h + p_d + p_g + p_\sigma \quad (1.12)$$

Anche in questo caso, il termine relativo all'interazione con le gocce dello spray  $p_d$  dipende dal meccanismo di impatto che ha luogo. In tutti i casi, esso è esprimibile come la variazione della quantità di moto delle particelle nella direzione perpendicolare alla superficie, sia che esse si immergano nel film annullando tale componente (gocce che aderiscono completamente o in parte durante lo splash), sia che la invertano, per effetto di un rimbalzo o nel caso dei pacchetti secondari che si distaccano a seguito dello splash;

- $\mathbf{S}_u^t$  rappresenta la quantità di moto persa dalle gocce all'impatto lungo la direzione tangenziale. Essa concorre al moto del fluido depositato sulle pareti e dipende dal regime di impatto che si instaura;
- $\mathbf{S}_u^m$  valuta lo scambio di quantità di moto tra la fase liquida e quella gassosa per effetto dei processi evaporativi e può essere espresso nel seguente modo:

$$S_m^v \cdot \mathbf{u} \quad (1.13)$$

dove  $S_m^v$  è stato introdotto nella relazione (1.10);

- $\mathbf{F}_{vol}$  esprime il contributo dovuto alle forze di volume, come ad esempio la gravità;

- $F_\tau$  include gli sforzi di taglio che si generano in corrispondenza delle superfici di interfaccia liquido-aria e liquido-parete. Essi vengono calcolati tenendo conto del fatto che il regime di moto nel film è laminare e che i gradienti di velocità in direzione tangenziale sono trascurabili rispetto ai corrispondenti termini diffusivi valutati lungo la normale alla superficie (ipotesi di film sottile).

### 1.3.3 Equazione di conservazione dell'energia

L'equazione di conservazione dell'energia per un elemento di film fluido può essere formulata nel seguente modo:

$$\frac{\partial(\rho\delta h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\delta h \mathbf{u}) = S_h^d + S_h^m + \dot{Q} \quad (1.14)$$

Il termine  $S_h^d$  esprime la variazione di energia posseduta dal film causata dall'aumento di massa che lo costituisce a seguito dell'impatto dello spray, mentre  $S_h^m$  tiene conto dell'evaporazione di parte del liquido depositato a parete.  $\dot{Q}$  rappresenta, infine, il calore scambiato tra film e superficie solida e tra film e gas che lo lambisce.

# Capitolo 2

## La fluidodinamica computazionale

### 2.1 Introduzione alla CFD

La fluidodinamica computazionale (CFD, *Computational Fluid Dynamics*) è la tecnica che si occupa dello sviluppo di metodi e algoritmi atti a simulare problematiche che coinvolgono fluidi, analizzando di questi ultimi l'evoluzione temporale attraverso i parametri fluidodinamici principali. Nella pratica, la CFD fornisce una previsione qualitativa, e talvolta anche quantitativa, del comportamento dei fluidi in esame, consentendo la comprensione di schemi di flusso che si presentano complessi, costosi o impossibili da studiare con le tecniche sperimentali tradizionali.

Per la coerenza dei risultati ottenuti con la realtà e per la possibilità di eseguire parametrizzazioni per differenti configurazioni iniziali, geometrie e condizioni al contorno con maggior facilità rispetto alla sperimentazione classica, si può riconoscere nella CFD uno strumento vantaggioso e per questo sempre più utilizzato nel campo dell'industria e della ricerca. Al giorno d'oggi, esistono infatti numerosi software commerciali di simulazione CFD. Questo lavoro di tesi è stato svolto proprio utilizzando uno di questi software: **OpenFOAM-2.3.0**.

### 2.2 Il software OpenFOAM

OpenFOAM (*Open Source Field Operation and Manipulation*) è un codice di calcolo sviluppato in linguaggio C++, prodotto dalla società britannica OpenCFD Ltd. e rilasciato con licenza GPL (*General Public License*).

OpenFOAM si confronta con successo con le funzionalità dei maggiori pacchetti software CFD commerciali. Esso è dotato di una vastissima gamma di librerie contenenti i più importanti e diffusi metodi numerici e modelli fluidodinamici. Il suo utilizzo principale è la creazione di eseguibili detti *applications*. Le *applications* si dividono in due categorie:

- *solvers*, volti alla risoluzione dei problemi della meccanica del continuo;
- *utilities*, contenenti strumenti che coinvolgono la manipolazione dei dati (*pre-processing* e *post-processing*).

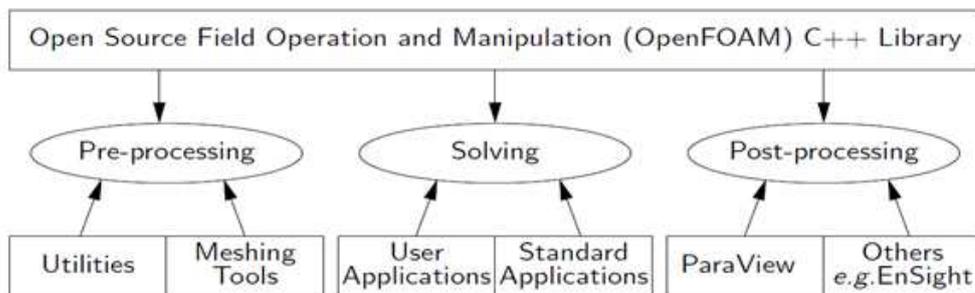


Figura 2.1. La struttura di OpenFOAM

Il software è fornito di un'estesa libreria di solvers in grado di risolvere problemi di svariata natura fisica. Un punto di forza di OpenFOAM è la possibilità per qualunque utente di creare un applicativo personalizzato, partendo da quelli base presenti nelle librerie.

OpenFOAM consente di condurre simulazioni in seriale o in parallelo. Per quanto riguarda l'avvio delle applicazioni su OpenFOAM si rimanda all'appendice A.

## 2.3 Il solutore reactingParcelFilmFoam

Il solutore `sprayFoam`, presente nel software OpenFOAM, è adatto per simulazioni di ambito motoristico, consentendo la modellazione dello spray di combustibile e l'attivazione dei processi di evaporazione e combustione. Nella versione 2.3.0 di OpenFOAM tale solutore non consente, però, la formazione di un film fluido. Per questa ragione, in questo lavoro di tesi, si è scelto di fare uso del solutore `reactingParcelFilmFoam`.

Il solutore `reactingParcelFilmFoam` si occupa di risolvere due domini fluidodinamici differenti, che devono tra loro comunicare: la geometria di base e la regione del film fluido. Per raggiungere tale scopo in maniera corretta, il solutore richiede che nella directory del caso siano presenti diversi cartelle e dizionari, come mostrato nella successiva struttura ad albero.

```
|-- 0
|   |-- H2O
|   |-- N2
|   |-- O2
|   |-- p
|   |-- p_rgh
|   |-- T
|   |-- U
|   |-- liquidFilm
|   |   |-- deltaf
|   |   |-- Tf
|   |   |-- Uf
|-- constant
|   |-- chemkin
|   |   |-- chem.inp
|   |   |-- therm.dat
|   |-- additionalControls
|   |-- chemistryProperties
|   |-- combustionProperties
|   |-- foam.dat
|   |-- foam.inp
|   |-- g
|   |-- liquidFilm
|   |   |-- polyMesh
|   |-- parcelInjectionProperties
|   |-- polyMesh
|   |-- radiationProperties
|   |-- reactingCloudProperties
|   |-- surfaceFilmProperties
|   |-- thermophysicalProperties
|   |-- turbulenceProperties
|-- system
|   |-- controlDict
|   |-- fvSchemes
|   |-- fvSolution
|   |-- liquidFilm
|       |-- fvSchemes
```

```
|-- fvSolution
```

La struttura minima necessaria per poter avviare una simulazione è costituita da tre cartelle: *constant*, *0*, *system*. I loro contenuti di base vengono integrati opportunamente a seconda delle caratteristiche della simulazione.

### 2.3.1 La cartella *constant*

La cartella *constant*, come evidenziato dal nome, contiene le informazioni relative alla simulazione che non mutano nel tempo. Al suo interno, infatti, si trovano una sottocartella, detta *polyMesh*, che fornisce una descrizione completa e dettagliata della struttura del dominio di analisi, e vari file, diversi a seconda della simulazione, in cui sono specificate le proprietà necessarie.

#### La sottocartella *polyMesh*

All'interno della sottocartella *polyMesh* sono contenute tutte le informazioni relative alla griglia (*mesh*) rappresentativa della geometria di studio, quali ad esempio facce, punti e confini. OpenFOAM mette a disposizione convertitori dai più diffusi formati e programmi di generazione dalla diversa complessità. Il programma più semplice è `blockMesh`. Tale programma richiede la presenza di un dizionario, detto `blockMeshDict`, che consente di creare griglie di svariate forme e dimensioni, attraverso la definizione dei vertici che compongono la griglia.

La creazione della griglia è una fase che richiede la massima attenzione in una simulazione fluidodinamica, poiché risulta di grande importanza trovare il giusto compromesso tra l'accuratezza del modello ed il suo costo, strettamente correlato al tempo di esecuzione.

Il solutore `reactingParcelFilmFoam` richiede che al dominio del film fluido sia assegnata una apposita regione, anch'essa definita tramite una griglia. Questa regione deve essere distinta dal dominio fluidodinamico di partenza, ma deve poter comunicare con esso. È sufficiente che la regione sia spessa una cella (di altezza qualsiasi) e che sia collocata nella zona in cui ci si aspetta di avere formazione di film fluido. Nel presente lavoro di tesi, la regione è stata chiamata *liquidFilm*.

Per definire la regione esistono sostanzialmente due strade:

- la creazione manuale di due griglie distinte per la regione e per il dominio fluidodinamico iniziale, successivamente accoppiate

- la creazione del dominio fluidodinamico iniziale e la successiva estrusione semi-automatica della regione.

In entrambi i casi, devono essere poste, in opportuna sede, le adeguate condizioni al contorno tra i due domini, affinché possa avvenire tra essi scambio di informazioni e materia.

### Il dizionario `reactingCloudProperties`

Il dizionario `reactingCloudProperties`, collocato all'interno della cartella `constant`, consente la modellazione della fase lagrangiana e l'attivazione della formazione di un film fluido.

Nella prima parte di tale dizionario vengono specificate le grandezze da risolvere ed alcune proprietà che si mantengono costanti. Nel resto del dizionario sono indicati i sottomodelli specifici per risolvere lo spray e consentire la formazione del film fluido.

Nella modellazione dello spray occorre definire la massa da iniettare, il numero di particelle, il diametro dell'iniettore e il profilo di iniezione. Alla voce `theta outer` il dizionario richiede che si inserisca l'angolo del semicono di iniezione.

Il dizionario consente, inoltre, di stabilire il regime di impatto spray-film desiderato per la simulazione.

### Ulteriori dizionari

Il solutore `reactingParcelFilmFoam` richiede che siano presenti i dati relativi alle specie chimiche coinvolte e agli annessi modelli di evaporazione e combustione. Questi dati devono essere collocati all'interno della cartella `chemkin` e dei dizionari `combustionProperties`, `chemistryProperties` e `thermophysicalProperties`. Per conformità col caso sperimentale, nel presente lavoro di tesi, sono stati disattivati i dizionari di `combustionProperties` e `chemistryProperties`. Il software OpenFOAM richiede che essi, benché disattivati, rimangano comunque presenti nella cartella ai fini del rispetto del corretto procedimento di svolgimento dei calcoli.

Il dizionario `additionalControls` si rende necessario per la risoluzione del campo fluidodinamico che non interessa la regione di film ed è stato in questo caso attivato.

Il dizionario `surfaceFilmProperties` regola la parte di evaporazione che riguarda il film, che nel presente lavoro di tesi non è stata trattata.

### 2.3.2 La cartella *system*

La cartella *system* contiene i dati inerenti alla gestione della simulazione. Al suo interno si devono necessariamente trovare tre file di cui non è possibile fare a meno:

- **controlDict**: in esso sono specificati il nome del solutore del caso, gli istanti di inizio e fine della simulazione, il **deltaT** delle iterazioni, il **writeControl** della simulazione, la precisione e il formato di scrittura dei dati.
- **fvSolution**: contiene le specifiche sui limiti di controllo dei residui, dei fattori di sotto rilassamento e degli eventuali correttori ortogonali e non ortogonali impiegati nella simulazione.
- **fvSchemes**: riporta le specifiche relative agli schemi numerici impiegati nella risoluzione delle equazioni differenziali, con la possibilità di scegliere come trattare singolarmente gradienti, divergenze e laplaciani.

Dal momento che sono presenti due domini di studio, il risolutore richiede che sia aggiunta alla cartella *system* anche una sottocartella relativa alla regione con i file **fvSolution** e **fvSchemes** appropriati.

### 2.3.3 La cartella *0*

Nella cartella *0* si trovano tutti i dettagli relativi all'inizializzazione del problema e all'assegnazione delle condizioni al contorno per le varie grandezze fluidodinamiche coinvolte. Questa cartella, come intuibile dal nome, rappresenta la base di partenza della simulazione e sarà in seguito affiancata da altre cartelle simili create durante i calcoli, in corrispondenza dei vari salvataggi.

Dal momento che, come spiegato nella sezione 1.2, il film fluido è dotato di una propria dinamica, il software richiede che siano manualmente aggiunte alla cartella *0* le condizioni iniziali relative alla velocità, alla temperatura e all'altezza di tale film.

# Capitolo 3

## La struttura del caso di tesi

### 3.1 Il caso sperimentale

Questo lavoro di tesi è stato svolto al fine di validare il modello di film fluido implementato in OpenFOAM-2.3.0, testando la congruenza dei risultati ottenuti, in termini di altezza del film fluido, con i dati sperimentali ottenuti da Le Coz et al. in *Application of laser induced fluorescence for measuring the thickness of liquid films on transparent wall*, Lisbona, 1994. Le misure di spessore di film liquido di Le Coz et al. sono state effettuate mediante tecniche di fluorescenza indotta dal laser (*Laser Induced Fluorescence*, LIF), che ben si prestano a misurazioni locali attraverso tubi.

Il caso di riferimento prevedeva un condotto cilindrico di diametro 36 mm e lunghezza 150 mm, inclinato di 30 gradi, dove un iniettore a benzina praticava un'iniezione pulsata con un angolo rispetto all'asse del tubo di 45 gradi (figura 3.1). All'interno del cilindro scorreva un flusso d'aria costante a pressione ambiente. Il tubo con all'interno l'aria costituiva il dominio fluidodinamico principale. È a questo che si è dovuta aggiungere la regione destinata alla formazione del film fluido.

Per quanto riguarda le condizioni operative relative alla simulazione ci si è basati sui dati riportati nella tabella 3.1.

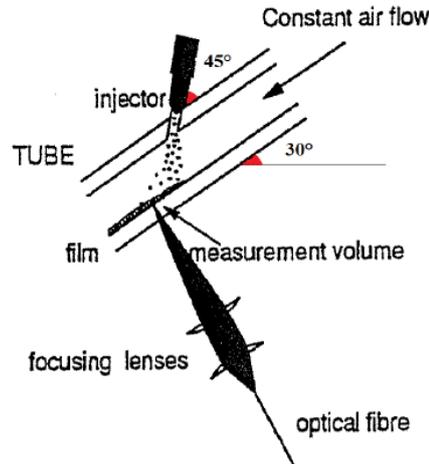


Figura 3.1. Schema del caso

Diametro medio di Sauter ( $\mu m$ )	90
Velocità delle gocce ( $m/s$ )	16
Durata dell'iniezione ( $ms$ )	6.7
Angolo del cono dello spray ( $deg$ )	30
Angolo asse iniettore/asse tubo ( $deg$ )	45
Frequenza di iniezione ( $Hz$ )	40
Quantità iniettata ad ogni iniezione ( $mm^3$ )	21.5
Flusso dell'aria ( $m^3/min$ )	0.42

Tabella 3.1. Condizioni operative

## 3.2 La creazione della griglia

Per la creazione della griglia cilindrica è stata utilizzata l'utility `blockMesh`, optando per un blocco centrale di sezione quadrata, circondato da quattro blocchi con un lato arcuato ciascuno, a formare una circonferenza (vedi fig. 3.2 e 3.3). Le informazioni sulla griglia sono riportate nel dizionario `blockMeshDict` (Appendice B).

L'esperimento di riferimento prevedeva un condotto inclinato di 30 gradi. Per evitare di progettare una griglia con tale inclinazione, si è scelto porre l'accelerazione di gravità stessa con un'inclinazione di 30 gradi, scomponendo tale vettore lungo la direzione  $z$  e lungo la direzione negativa delle  $x$ , come visibile nella figura 3.4.

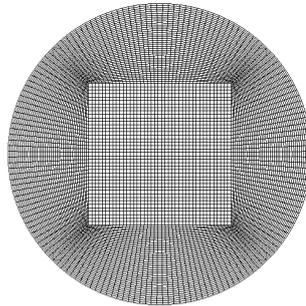


Figura 3.2. Sezione del condotto

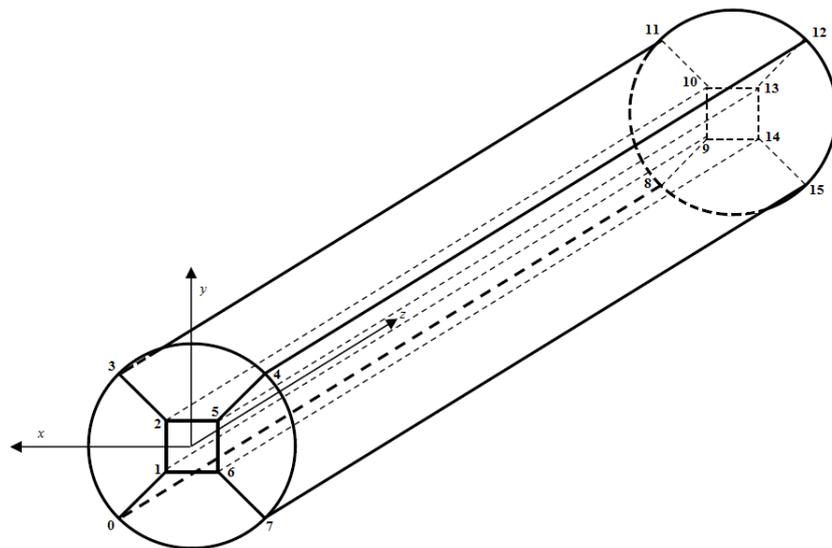


Figura 3.3. Visuale intera del condotto

Il risultato della scomposizione, inserito nel dizionario  $g$ , è stato il seguente:

$$(-9.81*\sin(30) \ 0 \ 9.81*\cos(30)) = (-4.905 \ 0 \ 8.495709211)$$

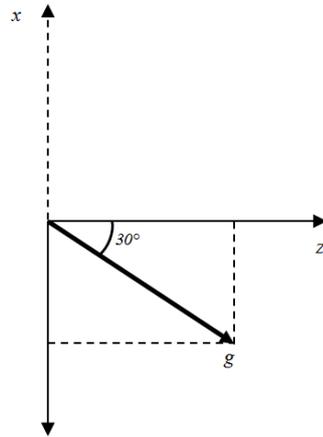


Figura 3.4. Scomposizione del vettore accelerazione di gravità

### 3.2.1 La creazione della regione del film fluido

Come introdotto nel capitolo 2, il software OpenFOAM richiede che nelle zone di condotto in cui si può avere la formazione di un film fluido, venga creata una regione apposita atta a contenere tale film. Benché solo una superficie del condotto in esame risultasse interessata da questo fenomeno, per semplicità si è scelto di creare una sorta di ‘pelle’ che avvolgesse l’intero condotto.

Per costituire la regione *liquidFilm* si è optato per la strada dell’estrusione da griglia preesistente. A tale scopo, è stato necessario aggiungere alla cartella *system* il dizionario `topoSetDict` (vedi Appendice B), che consente di rendere estrudibili le facce della geometria desiderate.

Per poter estrudere le *faceZones* appena definite, occorre che sia presente il dizionario `extrudeToRegionMeshDict`, riportato in Appendice B. L’altezza della regione è stata fissata a  $500 \mu\text{m}$ , con uno strato composto da una sola cella, in direzione normale a quella delle varie facce. Con il comando da terminale

```
extrudeToRegionMesh -overwrite
```

la regione *liquidFilm* ha preso definitivamente forma, dando origine ad una subcartella, nella cartella *constant*, denominata *liquidFilm*, contenente tutti i dati relativi alla porzione di griglia che costituisce la regione.



$$\frac{21,5 \text{ mm}^3}{0,0067 \text{ s}} * 7,2 * 10^{-7} \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3} = 0,00231044776 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (3.1)$$

Per consentire al sistema di raggiungere una condizione di regime, compatibilmente con quanto osservato nel caso di confronto, si è prevista una durata complessiva della simulazione di 450 ms, ottenendo così un profilo di portata composto da 18 trapezi (fig 3.6).

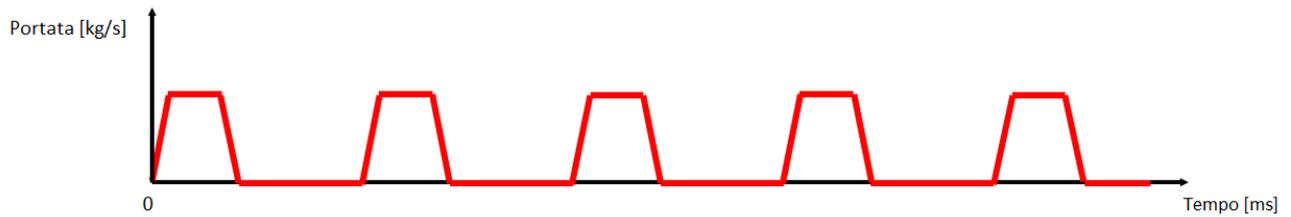


Figura 3.6. Profilo di iniezione complessivo

La massa totale è stata, di conseguenza, calcolata come l'area sottesa al profilo di iniezione di figura 3.6:

$$\frac{0,0067\text{s} + (0,0001 + 0,0067 + 0,0001)\text{s}}{2} * 0,00231 \frac{\text{kg}}{\text{s}} * 18 = 2,82798 * 10^{-4} \text{kg} \quad (3.2)$$

Avendo scelto di considerare un profilo di iniezione non ideale, ci si è trovati inevitabilmente ad iniettare più massa. Essendo, però, lo scarto temporale davvero ridotto, si è potuto assumere che tale scelta non avesse conseguenze considerevoli o forte impatto sui risultati.

Il diametro esterno del foro di iniezione (`outerDiameter`) è stato dimensionato con la formula:

$$D = \sqrt{\frac{4\dot{m}}{w\rho\pi}} \quad (3.3)$$

dove

$\dot{m} = 0,00231044776$  kg/s è la portata di iniezione

$w = 16$  m/s è la velocità con cui vengono iniettate le particelle

$\rho = 720$  kg/m<sup>3</sup> è la densità dell'equivalente della benzina.

Il diametro risultante era di  $5,0533209 \cdot 10^{-4}$  m.

Per quanto riguarda la posizione dell'iniettore, si è scelto di posizionarlo a 12 mm dall'origine lungo l'asse delle  $z$  e a 17 mm dall'origine lungo l'asse delle  $x$ , dunque non esattamente sulla 'pelle' esterna del condotto ma interno di un millimetro. Tale decisione è stata presa per evitare che le particelle leggere fossero portate ad accumularsi nell'intorno del foro di iniezione.

Da considerazioni sul diametro medio di Sauter, si è stimato che venissero iniettate 10000 particelle per ogni pulsazione, dunque, complessivamente si sono programmate 1482537 particelle/s (10000 particelle/0,0067 s).

Come tipologia di interazione spray-film fluido, in conformità con il caso sperimentale, si è lasciato attivo unicamente il regime di stick.

### 3.4 Le condizioni al contorno

Essendo due e distinti i domini di studio, è stato necessario porre condizioni iniziali nella cartella  $\theta$  sia per l'aria in ingresso nel condotto, che per il film fluido.

Poiché i dati forniti per il confronto mostravano una portata in volume d'aria in ingresso di 0,42 m<sup>3</sup>/min, ossia di 0,0084 kg/s (considerando una densità dell'aria di 1,2 kg/m<sup>3</sup>), la velocità dell'aria da impostare, sulla patch INLET lungo l'asse  $z$  è risultata pari a

$$\frac{0,0084 \frac{kg}{s}}{1,2 \frac{kg}{m^3}} * 0,00101787602 m^2 = 6,877 \frac{m}{s} \quad (3.4)$$

dove 0,00101787602 m<sup>2</sup> è l'area corrispondente al diametro di 36 mm che caratterizza il condotto.

La pressione dell'aria è stata posta a `zeroGradient` sulla patch INLET e a valore prefissato (10000 Pa) sulla patch OUTLET.

Il film fluido, anch'esso dotato di una propria dinamica, necessita che siano impostate condizioni al contorno relative a altezza del film, temperatura e velocità. Nella figura 3.7 sono mostrate le sezioni di ingresso (a sinistra) e uscita (a destra) del condotto. Si può notare come la regione avvolga il condotto (in bianco). I diversi colori servono per distinguere le zone per cui è stato necessario porre adeguate condizioni al contorno.

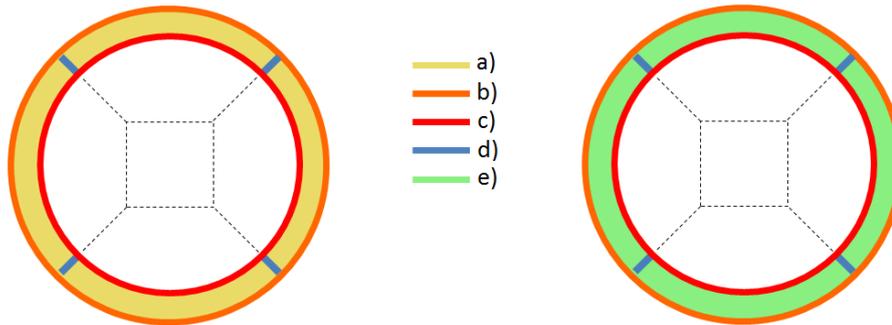


Figura 3.7. Sezioni di ingresso e uscita del condotto

Sulla patch `INLET`, figura 3.7 a), per la velocità si è impostata una condizione di `fixedValue`, ossia a un valore prefissato, in questo caso  $(0\ 0\ 0)$ . Per altezza e temperatura, invece, la condizione scelta è stata `zeroGradient`. La condizione `zeroGradient` sta ad indicare che il gradiente normale della grandezza è nullo. È necessario che tale condizione sia assegnata anche alla velocità sulla patch `OUTLET`, figura 3.7 e), così da consentire al film di uscire liberamente una volta raggiunta la fine del condotto.

Le condizioni, per tutte le grandezze, sulla superficie di confine tra il dominio del condotto e la regione (fig. 3.7 c)) sono state fissate a `zeroGradient`, così come anche quelle sulla superficie esterna della regione (fig. 3.7 colore b)).

Affinché ci fosse comunicazione tra le varie superfici estruse a formare la regione, fig. 3.7 d), si è resa necessaria per ognuna delle tre grandezze la condizione di `nonuniformTransformCyclic`.

### 3.5 Il dizionario `controlDict`

Il dizionario `controlDict` si colloca all'interno della cartella `system`. Esso consente di controllare le dinamiche inerenti la durata della simulazione, la frequenza delle

iterazioni e la precisione di scrittura dei dati.

I fenomeni di spray avvengono generalmente in tempi molto brevi, dell'ordine di  $10^{-6}/10^{-7}$  s. Per una maggior completezza dei risultati, si è optato per impostare un `deltaT` di  $2,5 \cdot 10^{-6}$  secondi e, come spiegato in precedenza, una durata totale della simulazione di 0,450 secondi (vedi Appendice B).



# Capitolo 4

## L'analisi dei risultati

### 4.1 L'analisi qualitativa

Di seguito vengono riportate alcune immagini relative alla simulazione effettuata, ottenute grazie al software di post-processing paraFoam. Le scale che affiancano le figure sono in metri.

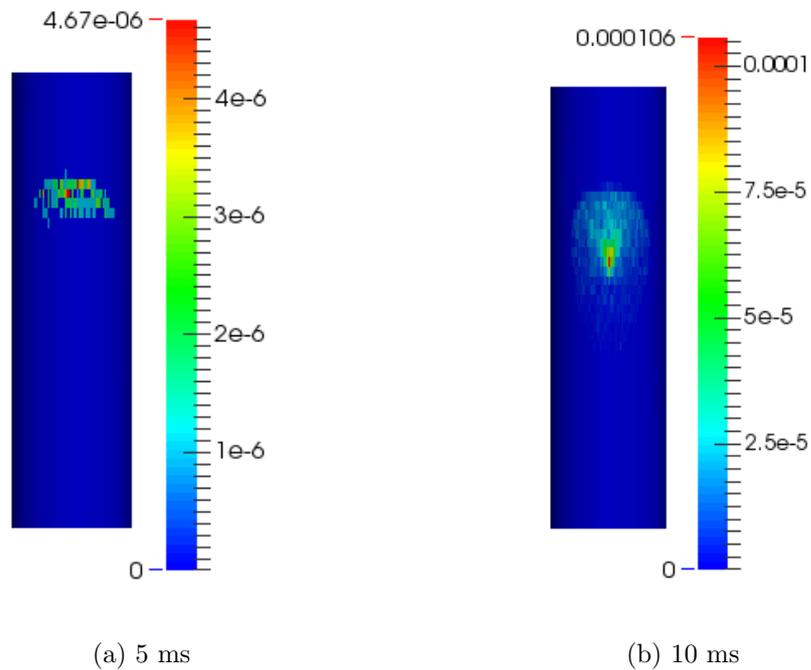


Figura 4.1. Evoluzione del film fluido ai primissimi istanti temporali

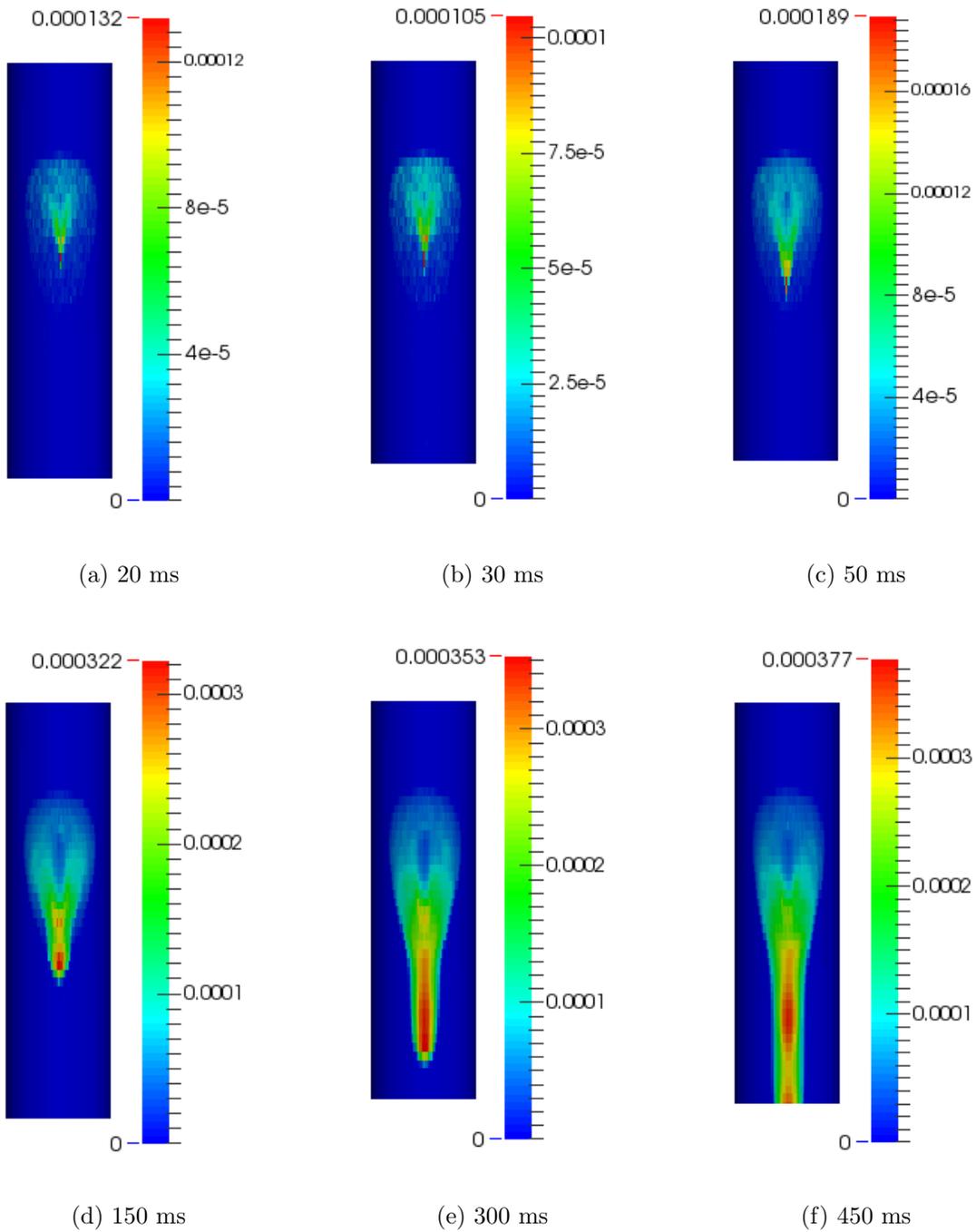


Figura 4.2. Evoluzione del film fluido a differenti istanti temporali

Alla figura 4.1a, è possibile vedere che al tempo di 5 ms lo spray ha già impattato sulla parete. Si osserva un iniziale accumulo di film in corrispondenza della zona centrale del cono di iniezione. Il film presenta un'altezza massima di circa 5 micron.

In figura 4.1b, si può notare come ulteriore massa abbia raggiunto il film (dai 5 ms alla fine della prima iniezione) accrescendone l'altezza fino a un valore massimo di 106  $\mu\text{m}$ . Si inizia a formare una colatura lungo il condotto, in maniera coerente con la forza di gravità e la quantità di moto apportata dall'impatto delle gocce di spray.

Al tempo di 20 ms, figura 4.2a, si può osservare come prosegue la fase di colatura della prima iniezione e come si inizi a svuotare la zona centrale del cono di iniezione.

In figura 4.2b, tempo 30 ms, 5 ms dopo la seconda iniezione, si osserva un leggero aumento di film nella zona centrale. Ciò significa che la massa della seconda iniezione ha iniziato ad impattare. Nel frattempo la colatura prosegue verso il basso.

In figura 4.2c, al tempo di 50 ms, risulta evidente come, in seguito alla quantità di moto apportata dalla seconda iniezione, la colatura prosegue la sua corsa con maggiore energia. Si osserva, inoltre, come, nell'avanzare verso valle, la colatura tenda ad assottigliarsi sempre di più.

Al tempo di 150 ms, figura 4.2d, è possibile vedere due punti di accumulo di massa, di altezza massima intorno ai 300 micron. La forma a 'goccia allungata' del film si delinea sempre più chiaramente.

In figura 4.2e, al tempo di 300 ms, la massa di film si presenta rilevante e estesa lungo la generatrice centrale del cilindro.

Verso la conclusione della simulazione, al tempo di 450 ms, riportato in figura 4.2f, il film, sempre più consistente, percola fino alla fine del condotto, raggiungendo picchi massimi di altezza di 377 micron.

## 4.2 L'analisi quantitativa

Il caso sperimentale prevedeva otto punti di misura dell'altezza del film disposti a 15 mm l'uno dall'altro come riportato in figura 4.3.

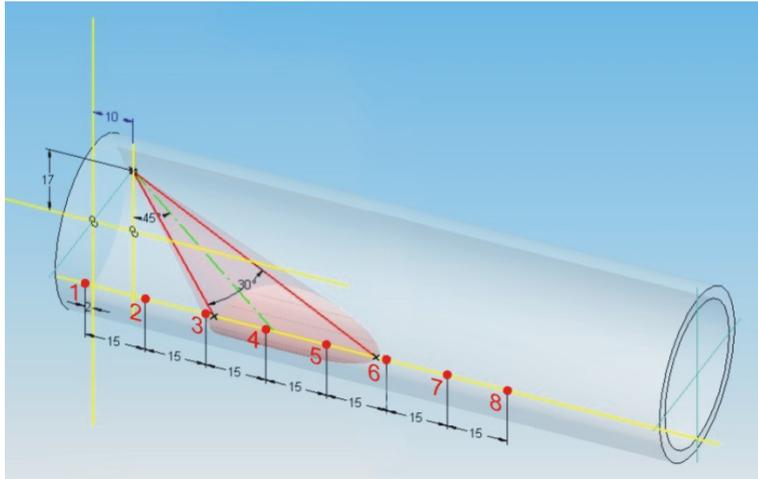


Figura 4.3. Distribuzione dei sensori

I risultati delle misurazioni in tali punti sono stati ottenuti grazie all'apposita utility `sample` (vedi Appendice B).

### 4.2.1 L'andamento dell'altezza del film sull'intera durata della simulazione

L'andamento temporale dell'altezza del film in corrispondenza del sensore numero 4, centro della zona di impatto, appare caratterizzato da picchi in coincidenza con gli impulsi di iniezione, ma con un comportamento non ripetibile (figura 4.4). Il profilo rivela accumulo, come se ci fosse un'insufficienza nella quantità di moto ricevuta dal film fluido. Inoltre, si può notare come il sistema a 450 ms non abbia ancora raggiunto un comportamento a regime. Ciò potrebbe essere dovuto all'effetto della posizione intrinseca del sensore o alla modellazione delle particelle in quella zona.

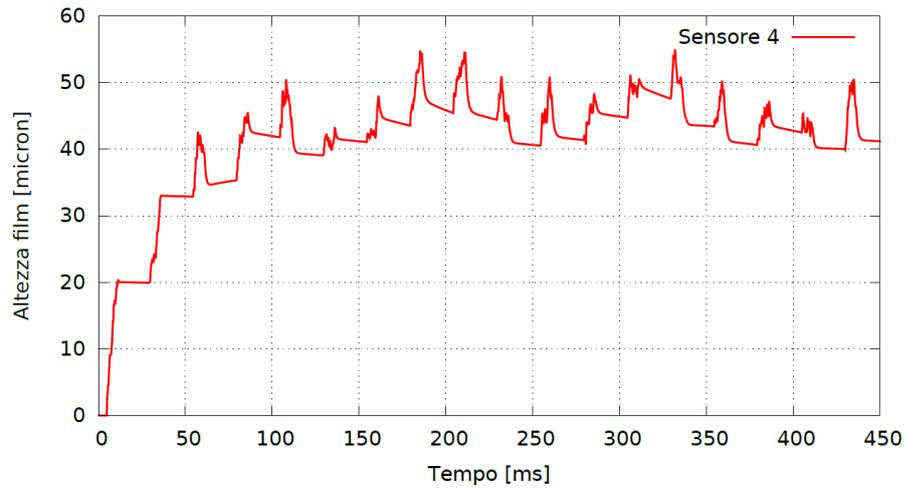


Figura 4.4. Andamento altezza film al sensore 4

L'andamento dell'altezza del film al sensore 5 (figura 4.5), invece, si mostra più regolare e conforme alle aspettative. Presenta, infatti, i dovuti picchi (con massimi nella fascia dei 75-100 micron) e altezze circa costanti tra un picco e l'altro, sintomo di non accumulo tra le varie iniezioni. Complessivamente, esibisce caratteristiche di ripetibilità.

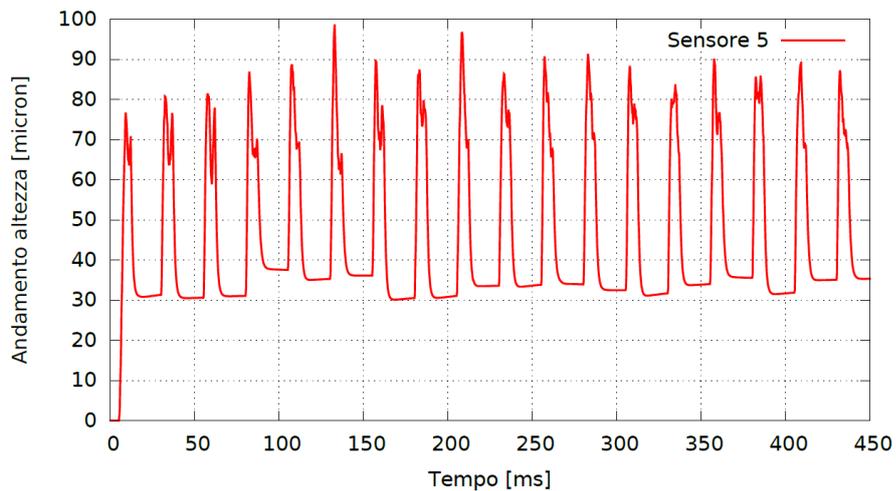


Figura 4.5. Andamento altezza film al sensore 5

## 4.2.2 Il confronto con i dati sperimentali

Si sono analizzati, poi, nello specifico, gli andamenti dell'altezza del film fluido per i sensori 4 e 5, per il solo periodo di un'iniezione (0.025 s). Nello specifico, si è scelto di osservare il periodo in cui la simulazione era andata a regime, ossia l'ultimo. Nei seguenti grafici si può vedere un confronto diretto tra i risultati sperimentali e quelli ottenuti con OpenFOAM-2.3.0.

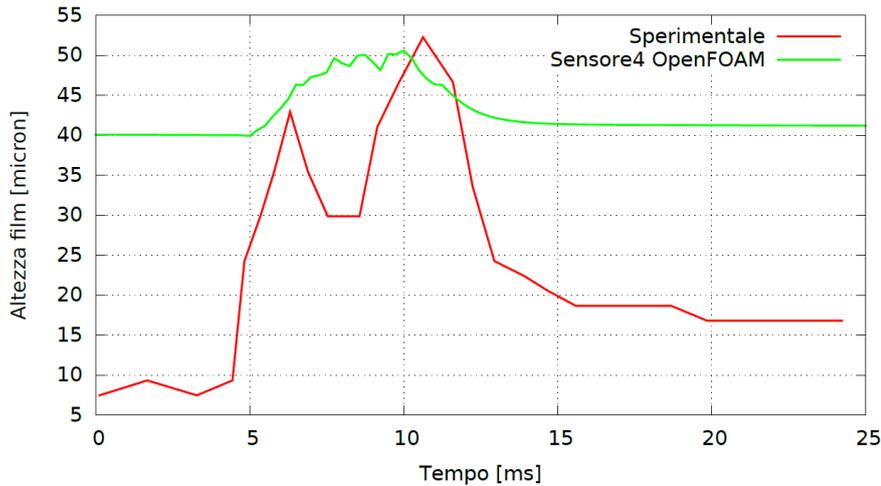


Figura 4.6. Confronto Sperimentale - OpenFOAM al sensore 4

Come risulta evidente, al sensore 4, figura 4.6, i dati ottenuti con OpenFOAM sovrastimano l'altezza del film, presentando un accumulo molto più importante rispetto al caso sperimentale. Ciò potrebbe essere dovuto al fatto che in tale posizione il film non riceva dallo spray energia sufficiente per fluire lungo il condotto e che ci sia, dunque, un problema sulla regolazione dello scambio di quantità di moto nel modello.

Il comportamento anomalo al sensore 4 si denota anche ponendo a confronto vari periodi della simulazione (vedi fig. 4.7). Si è scelto di confrontare quei periodi che dal grafico sull'intera durata sembravano più simili per forma al profilo sperimentale fornito. Ciò che emerge è una variabilità tra i diversi periodi che non dovrebbe teoricamente essere presente.

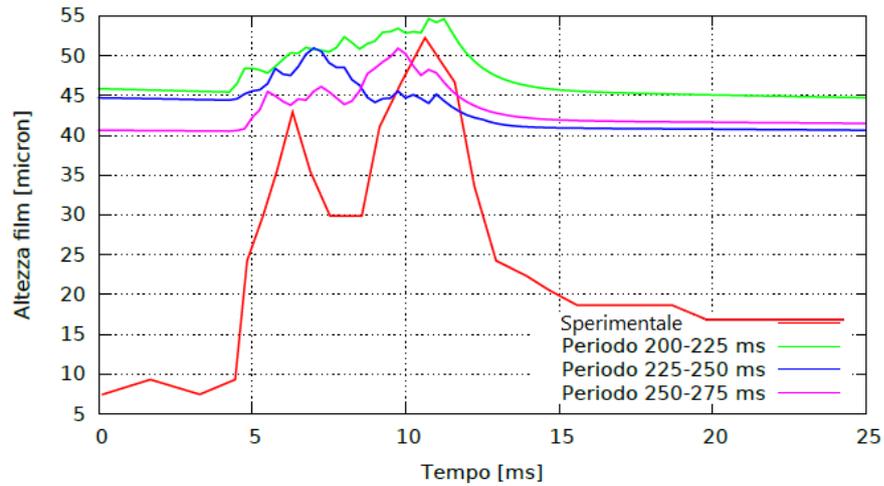


Figura 4.7. Confronto tra diversi periodi al sensore 4

In questo caso, il confronto al sensore 5 rivela, rispetto a quello al sensore 4, un andamento di altezza del film in qualche maniera più conforme ai risultati sperimentali.

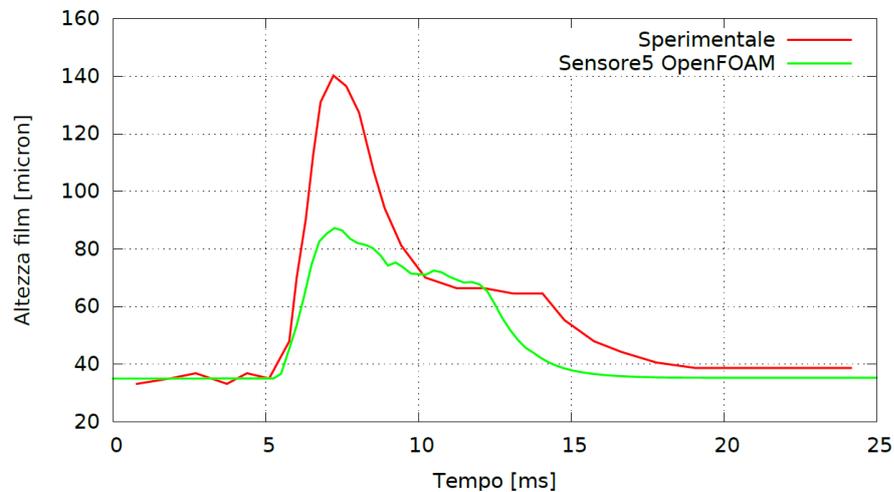


Figura 4.8. Confronto Sperimentale - OpenFOAM al sensore 5

Infatti, benché il picco ottenuto con OpenFOAM sottostimi quello sperimentale, si nota una maggior coerenza tra le due curve, a differenza di quanto osservato al sensore 4. Un accumulo simile a quello sperimentale sta ad indicare come nella zona

del sensore 5, rispetto a quella del sensore 4, la dinamica del film sia più attiva ed il film percoli maggiormente lungo il condotto. Poiché entrambe le postazioni di misura risentono dell'effetto della forza di gravità, è lecito pensare che il discrimine riscontrato tra i comportamenti dei due sensori sia legato allo scambio di energia con lo spray impattante. Nella zona di impatto dello spray, intorno del sensore 4, si ha il fulcro dello scambio energetico, mentre allontanandosi (zona sensore 5), tale scambio si affievolisce. Di conseguenza, se il problema nel codice fosse connesso a tale scambio, si spiegherebbe perché i risultati relativi al sensore 4, zona in cui questo scambio è più importante, siano così differenti e sovradimensionati rispetto al caso sperimentale.

### 4.3 Effetto della densità di griglia

Quando si parla di densità di griglia, si fa riferimento al numero di celle che compongono la griglia. La densità di griglia assume un ruolo molto importante dal momento che spesso i risultati sono strettamente ad essa correlati. La griglia inizialmente costruita prevedeva un numero di celle ragionevole, ipotizzato sulla base delle esperienze pregresse con il software OpenFOAM.

Per capire quanto, in questo lavoro di tesi, la scelta della griglia influisse sui risultati, si è optato per testare la medesima simulazione con due ulteriori griglie: una più rada rispetto al caso iniziale ed una più fitta.

Nel diradare la griglia preesistente, si è passati da una risoluzione di 840500 celle a una di 33750 celle. Tale prova è stata condotta al fine di accertarsi della presenza di un effettivo vantaggio nell'avviare simulazioni con griglie più fitte.

Il raffinamento della mesh di partenza, effettuato accrescendo la densità da 840500 celle a 2160000 celle, ha portato ad una simulazione pesante e decisamente più duratura rispetto al caso di base.

Le parti del file `blockMeshDict` che sono state modificate sono visibili nell'Appendice B.

Dal confronto in figura 4.9 emerge come, al sensore 4, paradossalmente, la curva relativa alla griglia rada, benché molto differente dalle altre due, presenti un andamento più regolare e ripetibile. La griglia base e quella fitta rivelano una forma simile ma non in rapporto costante. In certi tratti, infatti, il valore dell'altezza di film ottenuto con la mesh base supera quello ottenuto con la mesh fitta, in altri, viceversa.

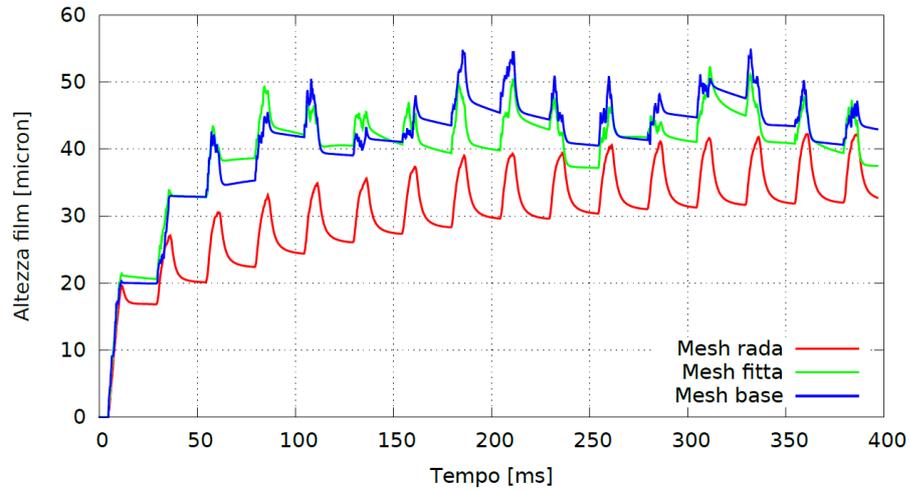


Figura 4.9. Confronto tra griglie al sensore 4

Dal confronto al sensore 5 appare evidente come la curva relativa alla mesh rada si discosti totalmente dalle altre due. Essa, infatti, si presenta diversa per forma e in condizioni di piena sovrastima rispetto alle altre due griglie. In questo caso, le curve relative alla mesh fitta e alla mesh base praticamente coincidono. Questo fa intendere che l'infittimento della griglia, con l'annesso appesantimento della simulazione, in tale circostanza, porti ad un beneficio sostanzialmente nullo.

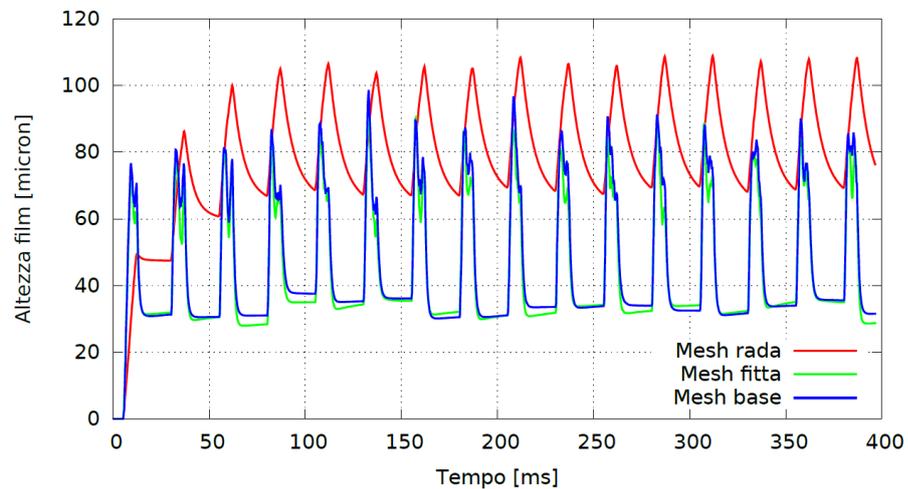


Figura 4.10. Confronto tra griglie al sensore 5

Nel complesso, si può concludere che il numero di celle adatto per un caso con una simile struttura sia all'incirca quello della mesh base. Dunque, la scelta di griglia iniziale si è rivelata coerente e opportuna.

Le figura 4.11 mostra due immagini di confronto tra griglia base (fig. 4.11a) e griglia fitta (fig. 4.11b) relative allo stesso istante temporale (0,3 secondi). Le scale affiancate sono in metri.

L'unica differenza che si può osservare risiede nel fatto che il film relativo alla griglia fitta abbia percolato leggermente di più rispetto a quello della griglia di base, come se avesse una maggiore spinta.

Il picco di altezza, inoltre, si presenta di qualche micron superiore nel caso della griglia fitta.

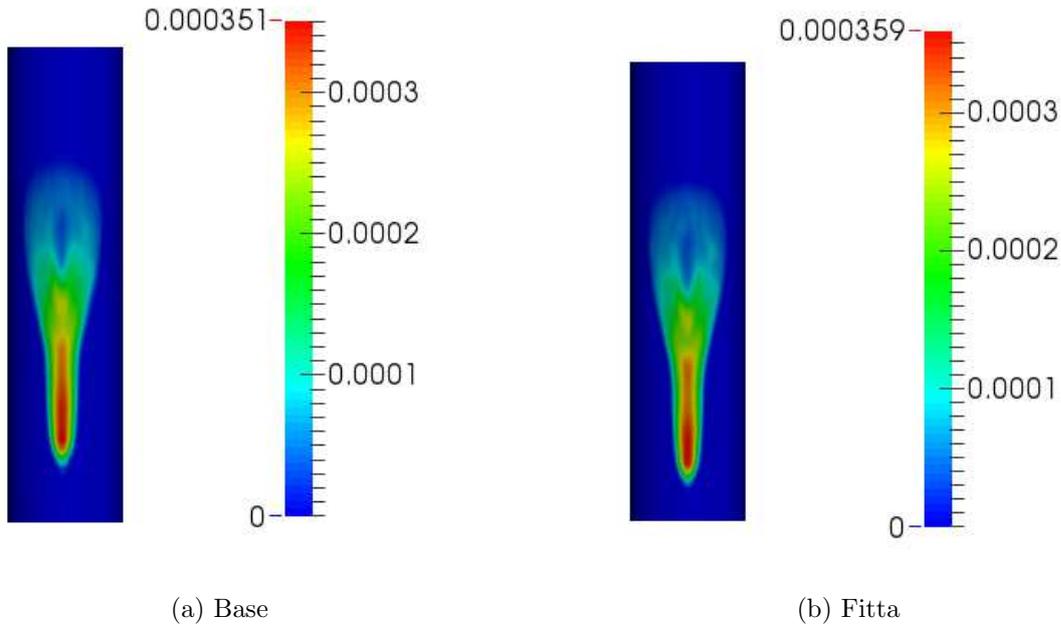


Figura 4.11. Confronto tra griglia base e griglia fitta a 300 ms

# Capitolo 5

## Conclusioni e sviluppi futuri

Il lavoro di validazione svolto evidenzia come, allo stato attuale e per la configurazione utilizzata, il modello di film fluido implementato in OpenFOAM-2.3.0 non risponda correttamente, in termini di dinamica del film fluido, nella zona di impatto dello spray (sensore 4). In tale zona, infatti, il modello sovrastima l'accumulo di film, mettendo in luce quello che potrebbe essere un problema nello scambio di energia tra lo spray impattante ed il film.

I risultati ottenuti al sensore 5, invece, sono globalmente coerenti con i dati sperimentali. Inoltre, i grafici di confronto relativi al sensore 5 permettono di affermare che il codice dipenda dalla griglia solo nella misura in cui essa si presenti estremamente rada.

Il passo successivo di questo processo di validazione, che esula dagli scopi di questo lavoro di tesi, sarebbe quello di testare, mantenendo il caso di Le Coz et al. come riferimento, diverse configurazioni e set-up, al fine di verificare il riproporsi o meno del medesimo problema riscontrato al sensore 4. Se questo si riproponesse ancora, sarebbe interessante effettuare una lettura del codice sorgente per comprendere a fondo come viene trattato lo scambio energetico.

Un altro aspetto da analizzare, al fine di validare il modello, sarebbe il comportamento del codice in regime di splash. Tale regime non è stato preso in considerazione nel presente lavoro di tesi per conformità col caso sperimentale di confronto.

Complessivamente, quest'area del codice OpenFOAM-2.3.0 dovrà essere oggetto di approfonditi studi successivi.



# Appendice A

## Avviare le applicazioni

Per lanciare una simulazione con il software OpenFOAM, è sufficiente posizionarsi all'interno della case directory e digitare il nome del solutore da terminale.

Se, però, si desidera avviare il solutore come processo di background e reindirizzare gli output di terminale ad un file di tipo *log* da poter visualizzare in seguito, occorre digitare (prendendo `simpleFoam` come solutore di esempio):

```
simpleFoam > l.log &
```

dove *l* è il nome scelto per il file.

Per monitorare il file *log* in ogni momento della simulazione, al fine di osservare residui e numero di iterazioni, è possibile utilizzare il comando da terminale

```
tailf -f > l.log &
```

Il lancio della simulazione può avvenire anche tramite più processori in parallelo, attraverso il comando

```
mpirun -np 4 simpleFoam -parallel > l.log &
```

dove 4 è il numero di processori a disposizione.

Il comando `top` consente di visualizzare quali applicazioni stanno lavorando in quell'istante sul processore.



# Appendice B

## Listati e utilities

### B.1 blockMeshDict

```
/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O p e r a t i o n | Version: 2.3.0 |
| \\ / A n d | Web: www.OpenFOAM.org |
| \\ / M a n i p u l a t i o n | |
\*-----*/
FoamFile
{
    version 2.0;
    format ascii;
    class dictionary;
    object blockMeshDict;
}
// * * * * *

convertToMeters 0.001;

vertices
(
    ( 12.72792206 -12.72792206 0) // 0
    ( 8.485281374 -8.485281374 0) // 1
    ( 8.485281374 8.485281374 0) // 2
    ( 12.72792206 12.72792206 0) // 3
    (-12.72792206 12.72792206 0) // 4
    (-8.485281374 8.485281374 0) // 5
)
```

```
( -8.485281374  -8.485281374    0) // 6
(-12.72792206  -12.72792206    0) // 7
( 12.72792206   -12.72792206   150) // 8
(  8.485281374  -8.485281374   150) // 9
(  8.485281374   8.485281374   150) // 10
( 12.72792206   12.72792206   150) // 11
(-12.72792206   12.72792206   150) // 12
( -8.485281374   8.485281374   150) // 13
( -8.485281374  -8.485281374   150) // 14
(-12.72792206  -12.72792206   150) // 15
);

blocks
(
  hex (1 2 5 6 9 10 13 14) (41 41 100) simpleGrading (1 1 1)
  hex (2 3 4 5 10 11 12 13) (41 41 100) simpleGrading (1 1 1)
  hex (5 4 7 6 13 12 15 14) (41 41 100) simpleGrading (1 1 1)
  hex (0 1 6 7 8 9 14 15) (41 41 100) simpleGrading (1 1 1)
  hex (0 3 2 1 8 11 10 9) (41 41 100) simpleGrading (1 1 1)
);

edges
(
  arc 4 3 (0.0 18 0.0)
  arc 7 4 (-18 0.0 0.0)
  arc 0 7 (0.0 -18 0.0)
  arc 3 0 (18 0.0 0.0)
  arc 11 12 (0.0 18 150)
  arc 12 15 (-18 0.0 150)
  arc 15 8 (0.0 -18 150)
  arc 8 11 (18 0.0 150)
);

boundary
(
  INLET
  {
    type patch;
    faces
```

```
(
    (7 6 1 0)
    (4 5 6 7)
    (0 1 2 3)
    (1 6 5 2)
    (3 2 5 4)
);
}

OUTLET
{
    type patch;
    faces
    (
        (9 10 13 14)
        (10 11 8 9)
        (13 12 15 14)
        (14 15 8 9)
        (10 11 12 13)
    );
}

UPPER
{
    type patch;
    faces
    (
        (11 3 4 12)
    );
}

LOWER
{
    type patch;
    faces
    (
        (7 0 8 15)
    );
}

FRONT
{
    type patch;
```

```

    faces
    (
        (0 3 11 8)
    );
}

    BACK
{
    type patch;
    faces
    (
        (7 4 12 15)
    );
}
);

// ***** //

```

## B.2 topoSetDict

```

/*----- C++ -----*\
| ===== |
| \\ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O p e r a t i o n | Version: 2.3.0 |
| \\ / A n d | Web: www.OpenFOAM.org |
| \\ / M a n i p u l a t i o n | |
\*-----*/
FoamFile
{
    version 2.0;
    format ascii;
    class dictionary;
    object topoSetDict;
}

// ***** //

```

```
actions
(
  {
    name    UPPER;
    type    faceSet;
    action  new;
    source  patchToFace;
    sourceInfo
    {
      name  UPPER;
    }
  }
  {
    name    UPPER;
    type    faceZoneSet;
    action  new;
    source  setToFaceZone;
    sourceInfo
    {
      faceSet  UPPER;
    }
  }
}

{
  name    LOWER;
  type    faceSet;
  action  new;
  source  patchToFace;
  sourceInfo
  {
    name  LOWER;
  }
}
{
  name    LOWER;
  type    faceZoneSet;
  action  new;
  source  setToFaceZone;
  sourceInfo
  {
    faceSet  LOWER;
  }
}
```

```
    }  
  
  {  
    name    FRONT;  
    type    faceSet;  
    action  new;  
    source  patchToFace;  
    sourceInfo  
    {  
      name FRONT;  
    }  
  }  
  {  
    name    FRONT;  
    type    faceZoneSet;  
    action  new;  
    source  setToFaceZone;  
    sourceInfo  
    {  
      faceSet FRONT;  
    }  
  }  
}  
  
  {  
    name    BACK;  
    type    faceSet;  
    action  new;  
    source  patchToFace;  
    sourceInfo  
    {  
      name BACK;  
    }  
  }  
  {  
    name    BACK;  
    type    faceZoneSet;  
    action  new;  
    source  setToFaceZone;  
    sourceInfo  
    {  
      faceSet BACK;  
    }  
  }
```

```

    }
);
// ***** //

```

## B.3 extrudeToRegionMeshDict

```

/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== | |
| \\ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O p e r a t i o n | Version: 2.3.0 |
| \\ / A n d | Web: www.OpenFOAM.org |
| \\ / M a n i p u l a t i o n | |
\*-----*-
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    object       extrudeToRegionMeshDict;
}
// ***** //

region          liquidFilm;
faceZones       (UPPER LOWER FRONT BACK);
sampleMode      nearestPatchFace;
oneD            false;
extrudeModel     linearNormal;
nLayers         1;
expansionRatio  1;
adaptMesh       yes;
linearNormalCoeffs
{
    thickness     0.00050;
}
// ***** //

```

## B.4 reactingCloudProperties

```

/*-----*- C++ -*-----*\
| ===== |
| \\ / F i e l d | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox |
| \\ / O p e r a t i o n | Version: 2.3.0 |
| \\ / A n d | Web: www.OpenFOAM.org |
| \\ / M a n i p u l a t i o n | |
\*-----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "constant";
    object       reactingCloudProperties;
}
// ***** //

solution
{
    active        true;
    coupled       no;
    transient     yes;
    cellValueSourceCorrection no;
    maxCo         0.3;

    sourceTerms
    {
        schemes
        {
            rho          explicit 1;
            U            explicit 1;
            Yi           explicit 1;
            h            explicit 1;
            radiation    explicit 1;
        }
    }

    interpolationSchemes
    {
        rho            cell;
        U              cellPoint;
    }
}

```

```
        thermo:mu      cell;
        T              cell;
        Cp            cell;
        kappa         cell;
        p             cell;
    }

    integrationSchemes
    {
        U              Euler;
        T              analytical;
    }
}

constantProperties
{
    rho0              1000;
    T0                300;
    Cp0               4187;

    constantVolume   false;
}

subModels
{
    particleForces
    {
        sphereDrag;
        gravity;
    }

    injectionModels
    {
        model1
        {
            type          coneNozzleInjection;
            SOI           0;
            massTotal     1.2568835e-4;
            parcelBasisType mass;
            injectionMethod disc;
            flowType      flowRateAndDischarge;

            outerDiameter 5.0533209e-4;
        }
    }
}
```

```
innerDiameter  0;
duration       0.200;
position       ( 0.017 0.0 0.012);
direction      (-1 0 1);
parcelsPerSecond 1492537;
flowRateProfile table
(
(0              0)
(0.0001        0.00231044776)
(0.0068        0.00231044776)
(0.0069        0)
(0.025         0)
(0.0251        0.00231044776)
(0.0318        0.00231044776)
(0.0319        0)
(0.05          0)
(0.0501        0.00231044776)
(0.0568        0.00231044776)
(0.0569        0)
(0.075         0)
(0.0751        0.00231044776)
(0.0818        0.00231044776)
(0.0819        0)
(0.100         0)
(0.1001        0.00231044776)
(0.1068        0.00231044776)
(0.1069        0)
(0.125         0)
(0.1251        0.00231044776)
(0.1318        0.00231044776)
(0.1319        0)
(0.15          0)
(0.1501        0.00231044776)
(0.1568        0.00231044776)
(0.1569        0)
(0.175         0)
(0.1751        0.00231044776)
(0.1818        0.00231044776)
(0.1819        0)
(0.200         0)
(0.2001        0.00231044776)
(0.2068        0.00231044776)
```

```
(0.2069          0)
(0.225           0)
(0.2251      0.00231044776)
(0.2318      0.00231044776)
(0.2319          0)
(0.250         0)
(0.2501      0.00231044776)
(0.2568      0.00231044776)
(0.2569          0)
(0.275         0)
(0.2751      0.00231044776)
(0.2818      0.00231044776)
(0.2819          0)
(0.300         0)
(0.3001      0.00231044776)
(0.3068      0.00231044776)
(0.3069          0)
(0.325         0)
(0.3251      0.00231044776)
(0.3318      0.00231044776)
(0.2319          0)
(0.250         0)
(0.3501      0.00231044776)
(0.3568      0.00231044776)
(0.3569          0)
(0.375         0)
(0.3751      0.00231044776)
(0.3818      0.00231044776)
(0.3819          0)
(0.400         0)
(1000          6.6502)

);

Cd          constant 0.9;

thetaInner  constant 0.0;
thetaOuter  constant 15.0;

sizeDistribution
{
```

```
type fixedValue;
fixedValueDistribution
{
    value 0.00009;
}
}
}
}

dispersionModel none;

patchInteractionModel standardWallInteraction;

heatTransferModel none;

compositionModel singlePhaseMixture;

phaseChangeModel none;

stochasticCollisionModel none;

surfaceFilmModel thermoSurfaceFilm;

radiation off;

standardWallInteractionCoeffs
{
    type stick;
}

thermoSurfaceFilmCoeffs
{
    interactionType absorb;
    deltaWet 0.0005;
    Adry 2630;
    Awet 1320;
    Cf 0.6;
}
```

```
singlePhaseMixtureCoeffs
{
    phases
    (
        liquid
        {
            H2O      1;
        }
    );
}
```

```
cloudFunctions
{
    particleCollector1
    {
        type          particleCollector;

        mode          concentricCircle;
        origin         (0.05 0.025 0.005);
        radius         (0.01 0.025 0.05);
        nSector        10;
        refDir         (1 0 0);
        normal         (0 0 1);

        negateParcelsOppositeNormal no;
        removeCollected no;
        surfaceFormat  vtk;
        resetOnWrite   no;
        log            yes;
    }
}
```

```
// ***** //
```

## B.5 L’utility sample

Il dizionario `sampleDict` deve essere inserito nella cartella *system* nel caso in cui si vogliano misurare grandezze in determinati punti o zone della geometria in esame. In esso sono specificati il tipo di formato in cui scrivere i risultati, il tipo di ‘sensore’ da applicare e la posizione spaziale in cui collocarlo.

Nel presente caso di tesi, al fine di poter confrontare i risultati ottenuti tramite la simulazione con OpenFOAM con quelli sperimentali, è stata utilizzata una linea, da un’estremità all’altra del condotto, che ricadesse nella pelle esterna, ossia nella regione destinata alla formazione del film fluido, e raccogliesse le informazioni corrispondenti alle varie stazioni di misura del caso sperimentale. Tale linea è stata inserita nel dizionario `sampleDict` ed è di seguito riportata.

```
lineX1
{
    type          uniform;
    axis          z; //distance;

    start         (-0.01845 0.0 -0.00001);
    end           (-0.01845 0.0 0.15001);
    nPoints       50;
}
```

Una volta che la simulazione è giunta a termine, è stato possibile, tramite il comando

```
sample -region liquidFilm
```

ottenere i valori delle misurazioni di altezza del film effettuate lungo il condotto.

Per poter graficare l’andamento dell’altezza del film fluido in funzione del tempo, così da confrontare i risultati con quelli dell’esperimento, è stato necessario estrarre, per ciascuno degli scarichi della simulazione, l’altezza del film fluido relativa alla  $z$  corrispondente al sensore desiderato. I sensori di maggior interesse per questo caso di tesi sono stati 4 e 5.

## B.6 Parti del `blockMeshDict` modificate

### B.6.1 Griglia rada

```
blocks
(
  hex (1 2 5 6 9 10 13 14) (15 15 30) simpleGrading (1 1 1)
  hex (2 3 4 5 10 11 12 13) (15 15 30) simpleGrading (1 1 1)
  hex (5 4 7 6 13 12 15 14) (15 15 30) simpleGrading (1 1 1)
  hex (0 1 6 7 8 9 14 15) (15 15 30) simpleGrading (1 1 1)
  hex (0 3 2 1 8 11 10 9) (15 15 30) simpleGrading (1 1 1)
);
```

### B.6.2 Griglia fitta

```
blocks
(
  hex (1 2 5 6 9 10 13 14) (60 60 120) simpleGrading (1 1 1)
  hex (2 3 4 5 10 11 12 13) (60 60 120) simpleGrading (1 1 1)
  hex (5 4 7 6 13 12 15 14) (60 60 120) simpleGrading (1 1 1)
  hex (0 1 6 7 8 9 14 15) (60 60 120) simpleGrading (1 1 1)
  hex (0 3 2 1 8 11 10 9) (60 60 120) simpleGrading (1 1 1)
);
```



# Bibliografia

- [1] JF Le Coz, C Catalano, and T Baritaud. *Application of laser induced fluorescence for measuring the thickness of liquid films on transparent wall*. In *7th Int. Symposium on application laser techniques to fluid mechanics*, Lisbon, Portugal, 1994.
- [2] M Zambanini. *Modello del film fluido derivante dalla interazione parete-spray: sviluppo ed evoluzione*. Università di Bologna, 2007.
- [3] A Pati e M Trapletti. *Modellazione multidimensionale dell'evoluzione degli spray per motori ad iniezione diretta e ad accensione comandata*. Politecnico di Milano, 2014.
- [4] OpenFOAM-2.3.0 UserGuide.



# Ringraziamenti

Vorrei cogliere l'occasione per ringraziare di cuore la mia famiglia e in particolare i miei genitori, che in tutti questi anni hanno incoraggiato le mie scelte scolastiche, consentendomi di affrontare con serenità anche la sfida di iscrivermi ad Ingegneria dopo il Liceo Classico. Un altro grazie speciale va senza dubbio a Tommy, per la complicità, l'ascolto e le risate che mi regala ogni giorno. Voglio dire, poi, un grazie sincero anche ai miei amici per il loro essere sempre presenti.

Ringrazio, infine, il Prof. Cazzoli per avermi seguito durante questo lavoro di tesi con grande disponibilità e per essere stato capace di fornirmi i giusti input per trovare da sola le soluzioni ai problemi che man mano mi si presentavano.