

Politecnico di Torino

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA E AEROSPAZIALE (DIMEAS) Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aerospaziale

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

Analisi delle forze aerodinamiche agenti su un veicolo ad alte prestazioni con l'implementazione di un modello termico completo

Alfa Romeo 4C

Candidato: **Porta Massimiliano** Matricola S239842 Relatore: **Prof. Iovieno Michele**

Correlatori: Ing. Gautero Matteo Ing. Paola Nicola

Alla mia famiglia.

"Sembra sempre impossibile, finché non viene fatto." – Nelson Mandela –

Ottobre 2019

In collaborazione con





PREFAZIONE

Fin dalla nascita del motore a scoppio e della sua applicazione nel mondo dei trasporti ad inizio '900, la ricerca della performance intesa come velocità è sempre stata una prerogativa per i progettisti di tutto il mondo. Ancora oggi, l'ambiente del *motorsport* è fortemente incentrato nella rincorsa di questo obiettivo. Per tale motivo, si definisce un *veicolo ad alte prestazioni* un mezzo stradale le cui performance si adattano perfettamente alle esigenze e all'impiego in un circuito con relative competizioni dedicate.

Con lo scopo di raggiungere e superare i limiti progettuali di un oggetto tanto affascinante quanto complesso, quale un'automobile, divenne fondamentale l'introduzione della *Computational Fluid Dynamic*, di pari passo con lo sviluppo delle tecnologie e della potenza di calcolo a disposizione. Infatti, nel giro di pochi decenni, si è arrivati ad avere possibilità di calcolo che solo 30 anni fa sembravano impossibili da raggiungere. Per questo motivo, i modelli che descrivono la fisica di un problema da simulare sono diventati sempre più precisi, potendo andare a studiare discretizzazioni spaziali (e/o temporali nel caso non stazionario) sempre più fitte con tempistiche ragionevoli in ottica di inserimento nel processo produttivo di un'azienda.

In questo scenario, si inserisce l'attività di questa *Tesi di Laurea* con la gentile collaborazione di un importante azienda, leader nel settore *automotive*: il gruppo *Fiat Chrysler Automobiles*. Presso le gallerie del vento *Aerothermal* (in Orbassano, provincia di Torino), negli uffici preposti alla simulazione, sono stati messi a disposizione *know-how* e capacità importanti di calcolo in termini di processori e memoria, come si potrà meglio apprezzare nel seguito.

Lo scopo del lavoro è possibile riassumerlo come un confronto di risultati tra due metodologie: la prima, consolidata e globalmente accettata nel settore, è la classica analisi CFD aerodinamica, che non considera alcun contributo termico rilasciato dal veicolo, come se esso, nelle condizioni di utilizzo, fosse a motore spento; la seconda invece, innovativa e presumibilmente di futura applicazione, sfrutta un calcolo accoppiato tra due programmi CFD e tiene conto dell'energizzazione del flusso, riscaldato dal passaggio, per esempio, attraverso o nelle vicinanze, del radiatore o altre sorgenti. Queste due metodologie saranno messe a confronto, analizzando la variazione dei coefficienti di portanza e resistenza, le implicazioni in termini di *mesh* e, naturalmente, le differenze di tempo per la conclusione delle rispettive simulazioni. Per svolgere ciò, è stata scelta un'autovettura del *brand (Alfa Romeo* 4C) che potesse rispecchiare le caratteristiche di veicolo ad alte prestazioni, essendo interessante vedere oltre alla variazione dei coefficienti per una data velocità, eventuali cambiamenti al crescere di essa (fino alla velocità massima).

INDICE

Elenco delle figure 8 Elenco delle tabelle 9 1 AERODINAMICA APPLICATA ALLE AUTOMOBILI: STATO DELL'ARTE 10 Introduzione 1.1 10 Segmenti di mercato 1.2 12 1.2.1 Veicoli commerciali 12 1.2.2 Fuoristrada 13 SUV 1.2.3 14 Utilitarie 1.2.4 15 Berline 1.2.5 16 Sportive 1.2.6 17 1.2.7 Da competizione 18 Alfa Romeo 4C 1.3 19 Caratteristiche tecniche 1.3.1 20 Peculiarità aerodinamiche 1.3.2 22 Tipologie di calcoli CFD applicati nel settore automotive 26 1.4 1.4.1 Analisi aerodinamica 26 Analisi termica 1.4.2 27 Analisi aeroacustica 28 1.4.3 CASO STANDARD: MODELLO E RICHIAMI TEORICI 2 29 2.1 Software e hardware utilizzati 29 Software 2.1.1 29 2.1.2 Hardware 30 2.2 Analisi preliminare – ANSA 31 2.2.1 Masse radianti 33 2.2.2 Ruote 34 2.3 Macro 35 2.4 Star CCM+ 36 2.4.1 Mesh 36 Fisica e condizioni iniziali 2.4.2 38 Regions 2.4.3 43 Solver 2.4.4 43 3 ANALISI DEI RISULTATI E CONVERGENZA 46 3.1 Obiettivi 46 3.2 Prime soluzioni 47 Problema di convergenza al variare della misura di 3.2.1 mesh 51 3.3 Risultati corretti 62 3.4 Analisi temporale 66 CASO TERMICO: MODELLO E RICHIAMI TEORICI 69 4 4.1 Scopo 69 4.2 Analisi preliminare – ANSA 69 4.3 TAITherm 71

4.3.1 Conduzione 71

- 4.3.2 Convezione 72
- 4.3.3 Irraggiamento 72

4.3.4 Modello 73

- 4.3.5 Impostazioni del solutore 74
- 4.4 STAR-CCM+ 74 75
 - 4.4.1 Regions
- 4.5 Macro termica e procedura di accoppiamento 76
- 4.6 Coupled vs segregated 79
- 5 CONFRONTO DEI RISULTATI 82
 - 5.1 Risultati 82
 - 5.1.1 Convergenza al variare della *base size* 86
 - 5.2 Analisi temporale 89
- 6 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI 91
 - 6.1 Conclusioni 91
 - 6.1.1 C_{x} 91
 - 6.1.2 C_z 91
 - 6.2 Sviluppi futuri 96
- 7 RINGRAZIAMENTI 98
- Bibliografia 100

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1.1	Esempio di veicoli commerciali 12
Figura 1.2	Esempio di fuoristrada 13
Figura 1.3	Esempio di SUV 14
Figura 1.4	Esempio di Utilitarie 15
Figura 1.5	Esempio di Berline 16
Figura 1.6	Esempio di auto Sportive 17
Figura 1.7	Esempio di auto da Competizione 18
Figura 1.8	Alfa Romeo 4C <i>coupé</i> 19
Figura 1.9	Alfa Romeo 4C <i>spider</i> 19
Figura 1.10	Alfa Romeo 4C – Motore 21
Figura 1.11	Alfa Romeo 4C – Abitacolo 22
Figura 1.12	Alfa Romeo 4C – Fondo piatto e diffusore (ANSA) 23
Figura 1.13	Alfa Romeo 4C – Spoiler 23
Figura 1.14	Alfa Romeo 4C – Presa d'aria intercooler 24
Figura 1.15	Alfa Romeo 4C – Convogliatore radiatore (ANSA) 25
Figura 1.16	Dettaglio tetto apribile Fiat 500 L 28
Figura 2.1	Modello completo su ANSA 31
Figura 2.2	Masse radianti modellate su ANSA 33
Figura 2.3	MRF - ANSA 34
Figura 2.4	Finestra di comando della Macro 35
Figura 2.5	Rappresentazione dei prism layers 38
Figura 2.6	Boxes di infittimento 39
Figura 3.1	Piani di velocità – Normale asse Z (V = 130 km/h) 47
Figura 3.2	Deviatore di flusso nel diffusore (ANSA) 48
Figura 3.3	Integrale di convoluzione – Bolla di ricircolo 49
Figura 3.4	Piani di velocità – Normale asse Y (V = 130 km/h) 49
Figura 3.5	Piani di velocità (senza deviatore) – Normale asse Z
	(V = 130 km/h) 50
Figura 3.6	Piani di velocità (senza deviatore) – Normale asse Y
	(V = 130 km/h) 50
Figura 3.7	Confronto Y^+ a parete – $V = 170 \text{ km/h}$ 60
Figura 3.8	Confronto Y^+ a parete – $V = 210 \text{ km/h}$ 60
Figura 3.9	Confronto Y^+ a parete – $V = 250 \text{ km/h}$ 60
Figura 3.10	Cella di volume con diversa <i>base size</i> 67
Figura 4.1	Modello semplificato della vettura – ANSA 70
Figura 4.2	Modello della vettura importato su <i>TAITherm</i> 71
Figura 4.3	Differenza di temperatura tra i due modelli Coupled e
	Segregated su TAITherm – Estrattore 79
Figura 5.1	Andamento del ΔC_z al variare della velocità a fissata
	base size. 88
Figura 6.1	Piano di sezione (normale asse y) – Temperature caso
	250 km/h BS=10 mm 92

Figura 6.2	Piano di sezione (normale asse z) – Temperature del fondo piatto 93
Figura 6.3	Coefficiente di pressione – 210 km/h BS=10 mm 94
Figura 6.4	Piano di sezione (normale asse y) – Scia 210 km/h
-	BS=10 mm 94
Figura 6.5	Skin friction coefficient – 170 km/h BS=10 mm 95
Figura 6.5	$Skin friction coefficient - 1/0 \text{ km/n BS} = 10 \text{ mm} \qquad 95$

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1.1	Valori caratteristici di Mach e Reynolds per diversi
	mezzi e velocità 11
Tabella 1.2	Veicoli commerciali: Fiat Ducato 12
Tabella 1.3	Fuoristrada: Jeep Wrangler 13
Tabella 1.4	SUV: Alfa Romeo Stelvio 14
Tabella 1.5	Utilitarie: Lancia Y 15
Tabella 1.6	Berline: Alfa Romeo Giulia 16
Tabella 1.7	Sportive: Alfa Romeo Giulia QV 17
Tabella 1.8	Caratteristiche tecniche Alfa Romeo 4C 20
Tabella 3.1	Analisi – Funzione di mesh e velocità 46
Tabella 3.2	C_x normalizzato [%] 55
Tabella 3.3	C_z normalizzato [%] 56
Tabella 3.4	Altezza primo <i>prism layer</i> in funzione della velocità 59
Tabella 3.5	Altezza totale e numero di prism layer in funzione
	della velocità e mesh 61
Tabella 3.6	C_x normalizzato [%] – Prism layer modificati 62
Tabella 3.7	C_z normalizzato [%] – Prism layer modificati 64
Tabella 3.8	Numero di iterazioni in funzione della misura della
	base size 66
Tabella 3.9	Ore di calcolo e dimensioni del file .sim in funzione
	della mesh 66
Tabella 5.1	Differenze dei coefficienti aerodinamici tra i due mo-
	delli 86
Tabella 5.2	Ore di calcolo in funzione della mesh – Caso V =
	210 km/h 89

1 AERODINAMICA APPLICATA ALLE AUTOMOBILI: STATO DELL'ARTE

In questo Capitolo, dopo aver introdotto la definizione generale di *automobile*, sono presentate le principali categorie in cui si suddivide il mercato per identificare al meglio il segmento scelto. Successivamente, viene illustrato il veicolo utilizzato per l'analisi, evidenziandone le caratteristiche principali ed eventuali peculiarità. Infine vengono riassunte le tipologie di calcoli CFD che oggi vengono usualmente affrontati nello sviluppo di un'autovettura.

1.1 INTRODUZIONE

Prima di addentrarsi nell'analisi riportata nella prefazione, risulta doveroso introdurre l'oggetto protagonista del lavoro svolto: l'automobile. A tal fine, è possibile dare una prima definizione come riportato dalla *Treccani*:

Definizione 1.1 (Automobile). Si può definire *automobile* un veicolo a quattro ruote con motore generalmente a scoppio, adibito al trasporto di un numero limitato di persone su strade ordinarie.

Tale definizione, racchiude in maniera molto grossolana il settore *automotive*, senza entrare nello specifico. Per questo motivo, nella Sezione 1.2, si cercherà di dare un'idea più precisa della differenziazione presente oggi sul mercato.

Prima di fare ciò, è però utile inquadrare anche dal punto di vista fisico il problema: la principale differenza che caratterizza lo studio aerodinamico tra una vettura (stradale o da competizione come si vedrà nel seguito) ed un veicolo aeronautico (oltre alle dimensioni) è sicuramente la velocità di impiego e le finalità di un calcolo CFD. Nel caso di un aeromobile lo studio aerodinamico risulta importante in quanto l'obiettivo principe è quello di ottenere un corpo *aerodinamico*, che massimizzi la portanza e riduca il più possibile le perdite dovute alla resistenza. Nel caso invece di un'autovettura, soprattutto negli ultimi anni a causa delle sempre più stringenti norme ambientali, gli studi si sono concentrati particolarmente sulla riduzione della resistenza aerodinamica¹, in modo da ridurre i consumi e conseguentemente le emissioni. Volendo esplicitare meglio la differenza tra i due mezzi, è possibile, ad esempio, far riferimento ai due parametri che influenzano mag-

¹ Fatta eccezione per i veicoli da competizione dove, a causa dell'elevata potenza in gioco, è necessaria l'introduzione di superfici particolari (alettoni e *spoilers*) atte ad aumentare l'effetto deportante del veicolo in modo da avere una migliore aderenza tra le ruote ed il manto stradale

giormente il coefficiente di resistenza di un corpo in una corrente d'aria, identificate da J. Anderson [1] nei numeri di Reynolds e Mach:

$$M = \frac{V}{c_s} \qquad \qquad Re = \frac{\rho V L}{\mu}$$

dove V indica la velocità del veicolo, c_s quella del suono nel mezzo in cui opera lo stesso, ρ e μ rispettivamente la densità e la viscosità dinamica del mezzo e L una dimensione caratteristica del problema.

Tabella 1.1: Valori caratteristici di Mach e Reynolds per diversi mezzi e velocità

Tipo di veicolo	Reynolds	Mach
Airbus A320 (Flight Level 320)	$3.4 \cdot 10^7$	0.8
Flat 500 (150 km/m)	11 • 10	$\simeq 0.1$

Come si evince dalla Tabella 1.1, risultano chiare alcune semplificazioni che derivano dalle capacità operative diverse dei due mezzi: l'automobile lavora in un campo certamente incompressibile essendo il Mach a quella velocità di appena 0.1. Nel caso di macchine sportive con velocità di punta anche di 3 volte superiore rispetto a quella indicata, non si riuscirebbe in ogni caso a spingere il Mach oltre lo 0.3, valore generalmente assunto come limite per la definizione della tipologia del campo di moto. Quindi, in generale, per le velocità in gioco, la densità dell'aria viene (nelle simulazioni aerodinamiche tradizionali) considerata costante, con un enorme vantaggio semplificativo delle equazioni in gioco.

1.2 SEGMENTI DI MERCATO

Oggi giorno, il settore dell'automobile racchiude diverse tipologie di veicoli con l'intento di sopperire a tutte le esigenze che il mercato richiede. La breve analisi seguente serve a definire in quali di questi si colloca la macchina utilizzata per la presente Tesi e sarà scopo di ulteriori riflessioni finali. *I valori riportati non devono essere presi come assoluti, ma hanno l'intento di far comprendere al Lettore la suddivisione in termini di costo/potenza del settore automotive.*

1.2.1 Veicoli commerciali

La prima famiglia che si vuole analizzare raggruppa tutta una serie di veicoli concepiti per l'utilizzo industriale e commerciale, la cui funzione principale è quella di trasporto merci e/o attrezzature per il lavoro.



(a) Fiat Fiorino

(b) Fiat Ducato

Figura 1.1: Esempio di veicoli commerciali

Nella Figura 1.1 sono riportati due esempi: va da sè che ciascuno di essi può essere allestito in diverse configurazioni a seconda dell'utilizzo e del materiale (sia esso animato o inanimato) che deve essere trasportato.

Caratteristica	Valore
Prezzo	≃ 30.000 €
Alimentazione	Diesel – Benzina – Metano
Trazione	Anteriore
Cilindrata	2300cm^3
Potenza	80 ÷ 130 kW
Coppia	350 N m
Velocità max	160 km/h
0 - 100 km/h	$\simeq 13 \mathrm{s}$
Consumi (ciclo combinato)	$\simeq 14 \mathrm{km/l}$

Tabella 1.2: Veicoli commerciali: Fiat Ducato

Nella Tabella 1.2 si cerca di riassumere per sommi capi le caratteristiche principali di un veicolo d'esempio per la categoria: risulta evidente come, in veicoli del genere, gli aspetti più importanti siano la capacità di carico e i consumi, mentre naturalmente, gli aspetti più prestazionali passeranno in secondo luogo.

1.2.2 Fuoristrada

Nella categoria fuoristrada invece, rientrano tutti quei mezzi che hanno abbandonato le comodità del manto stradale per abbracciare il divertimento e complessità di un percorso sterrato.





Nella Figura 1.2 è riportato un esempio di veicolo *off-road*: questo nasce per affrontare i percorsi più accidentati e vede nelle sue caratteristiche principali qualità che difficilmente si trovano in altri mezzi.

Caratteristica	Valore
Prezzo	≃ 50.000 €
Alimentazione	Diesel – Benzina
Trazione	Integrale
Cilindrata	$3000 \div 3800 \mathrm{cm}^3$
Potenza	$130 \div 200 \mathrm{kW}$
Coppia	450 N m
Velocità max	160 km/h
0 - 100 km/h	$\simeq 10\mathrm{s}$
Consumi (ciclo combinato)	$\simeq 10 km/l$

Tabella 1.3: Fuoristrada: Jeep Wrangler

Nella Tabella 1.3 si cerca di riassumere per sommi capi le caratteristiche principali di un veicolo d'esempio per la categoria: il modello è dotato di marce ridotte e ampi angoli d'attacco per affrontare qualsiasi percorso. La coppia disponibile è veramente tanta, frutto di cilindrate davvero importanti: queste garantiscono una grande coppia motrice ma, al contempo, unendo ruote di dimensioni elevate e un'aerodinamica poco efficiente, fanno sì di avere consumi non proprio ridotti.

1.2.3 SUV

I *SUV* o *Sport Utility Vehicle* è una categoria di recente introduzione che vuole unire i pregi (e difetti) di fuoristrada e berline. Nello specifico si ottengono dei veicoli dalle dimensioni importanti sia in termini spaziali che di altezza da terra (ricordando quindi un'anima off-road) con la comodità (e lusso) delle berline più prestigiose.



Figura 1.3: Esempio di SUV

Nella Figura 1.3 sono riportati due esempi: la differenza in termini di prezzi è consistente ma ben rappresentano la categoria. Le dimensioni sono davvero imponenti con quasi 5 m di lunghezza (4.7 m lo Stelvio) e circa 2 m di larghezza.

Caratteristica	Valore
Prezzo	≃ 50.000 €
Alimentazione	Diesel – Benzina
Trazione	Posteriore – Integrale
Cilindrata	$2000 \div 2200 \mathrm{cm}^3$
Potenza	$150 \div 210 \mathrm{kW}$
Coppia	350 N m
Velocità max	200 km/h
0 - 100 km/h	\simeq 9 ÷ 10 s
Consumi (ciclo combinato)	$\simeq 10 \div 14 \text{km/l}$

Tabella 1.4: SUV: Alfa Romeo Stelvio

Nella Tabella 1.4 si cerca di riassumere per sommi capi le caratteristiche principali di un veicolo d'esempio per la categoria: nel caso specifico si può notare come tale veicolo sia molto distante in termini di dimensioni dall'ideale di fuoristrada agile e compatto. Inoltre se rapportato alla sua massa in ordine di marcia di oltre 1700 kg se ne deduce che risulta difficile vedere tale veicolo (così come il Compass ed altri mezzi della categoria) impiegato in un un percorso sterrato con fango e quant'altro, nonostante la presenza della trazione integrale. Infine, nell'uso urbano e extraurbano risultano sco-modi (basti pensare al sempre più difficile problema del parcheggio nelle grandi città) e poco efficiente in termini di consumo data la loro mole.

1.2.4 Utilitarie

Le utilitarie ricoprono forse il maggior spicchio nelle percentuali di vendita di tutte le case automobilistiche. Caratterizzate da costi accessibili, consumi irrisori e prestazioni sempre più interessanti, rappresentano la miglior soluzione per il trasporto di persone nei classici trasferimenti quotidiani.



Figura 1.4: Esempio di Utilitarie

Nella Figura 1.4 sono riportati due classici esempi: a prescindere dall'allestimento e/o motorizzazione, il basso peso e dimensioni vedono nell'utilizzo cittadino il loro *habitat naturale*, unito poi a costi di gestione assolutamente affrontabili, risultano essere un ottimo investimento.

Caratteristica	Valore
Prezzo	≃ 13.000 €
Alimentazione	Diesel – Benzina – Metano/GPL
Trazione	Anteriore
Cilindrata	$1000 \div 1200 \mathrm{cm}^3$
Potenza	$50 \div 70 \mathrm{kW}$
Coppia	120 N m
Velocità max	170 km/h
0 - 100 km/h	$\simeq 14 \mathrm{s}$
Consumi (ciclo combinato)	$\simeq 16.5 \mathrm{km/l}$

Tabella 1.5: Utilitarie: Lancia Y

Nella Tabella 1.5 si cerca di riassumere per sommi capi le caratteristiche principali di un veicolo d'esempio per la categoria: risulta evidente come, in veicoli del genere, gli aspetti più importanti siano il *comfort* e la facilità d'uso, cercando di limitare il più possibile i consumi. Naturalmente non vanno ricercate prestazioni elevate, ma bensì, apprezzarne le doti da *city-car*.

1.2.5 Berline

Nella famiglia delle berline, trovano qui (in questa trattazione, per semplicità descrittiva) collocazione le cosiddette 3 volumi, familiari, *Station Wagon...* che rispetto alle utilitarie vedono aumentare le loro dimensioni, sia in termini spaziali che di potenze installate, permettendo un utilizzo sia urbano che extraurbano con un occhio sempre ai costi di gestione.



Figura 1.5: Esempio di Berline

Nella Figura 1.5 sono riportati due esempi: tra le due auto ci sono differenze in termini di costo e prestazioni considerevoli, soprattutto in funzione dell'allestimento (motorizzazione e optional) che si decide di acquistare. Ciò che si può osservare dalle immagini è come all'aumentare della potenza in gioco, sia sempre più evidente una maggiore attenzione all'aerodinamica, compatibilmente con il budget progettuale che a sua volta si rifletterà sul costo della singola unità.

Tabella	1.6:	Berline:	Alta	Komeo	Giulia

Caratteristica	Valore
Prezzo	\simeq 40.000 Euro
Alimentazione	Diesel – Benzina
Trazione	(Anteriore) – Posteriore – Integrale
Cilindrata	$2000 \div 2200 \mathrm{cm}^3$
Potenza	$120 \div 210 \mathrm{kW}$
Coppia	350 N m
Velocità max	230 km/h
0 – 100 km/h	$\simeq 8 \div 11 \mathrm{s}$
Consumi (ciclo combinato)	$\simeq 14 \div 17 \mathrm{km/l}$

Nella Tabella 1.6 si cerca di riassumere per sommi capi le caratteristiche principali di un veicolo d'esempio per la categoria: il modello in particolare non ha la trazione anteriore ma è stata aggiunta nella tabella poiché altri mezzi (e.g. la Fiat Tipo) sono unicamente dotate di tale tipologia di trazione. In ogni caso, quello che si può ricavare da questi pochi dati è che, già per questa tipologia di mezzi, le prestazioni inizino ad essere di un certo livello e quindi, oltre a soddisfare gli utenti in termini di consumi e fruibilità quotidiana, non disdegnano il piacere di guida sportivo.

1.2.6 Sportive

Con la definizione di *auto sportiva* si raggruppano tutte quelle macchine che nascono direttamente con soluzioni pensate per l'uso in pista o che, modificando una vettura "di base", acquisisce un carattere, per l'appunto, sportivo.



Figura 1.6: Esempio di auto Sportive

Nella Figura 1.6 sono riportati due esempi che chiariscono il concetto: a sinistra si trova un modello nato prettamente per l'uso in pista, mentre a destra si trova un'auto nella sua versione più estrema, derivata dal modello analizzato in precedenza. Entrambe, però, sono accomunate da una grande quantità di potenza in termini di cavalli da scaricare a terra e per questo motivo sono visibili soluzioni aerodinamiche studiate ad hoc per migliorare il comportamento di guida.

Caratteristica	Valore
Prezzo	≃ 90.000 €
Alimentazione	Benzina
Trazione	Posteriore – (Integrale)
Cilindrata	$\simeq 3000 \mathrm{cm}^3$
Potenza	\simeq 380 kW
Coppia	600 N m
Velocità max	310 km/h
0 - 100 km/h	$\simeq 4 \mathrm{s}$
Consumi (ciclo combinato)	$\simeq 8 km/l$

Tabella 1.7: Sportive: Alfa Romeo Giulia QV

Nella Tabella 1.7 si cerca di riassumere per sommi capi le caratteristiche principali di un veicolo d'esempio per la categoria: i materiali adottati, le potenze in gioco e le soluzioni impiegate rendono questi veicoli capaci di dimostrare il loro vero potenziale (forse) unicamente tra i cordoli, ma risultano essere omologabili per la libera circolazione su strada. Naturalmente il costo così come i consumi sono proibitivi, soprattutto se la guida inizia ad essere particolarmente spinta. Come detto tale mezzo nasce come estremizzazione del veicolo di base, mentre la Ferrari 458 Italia vanta un costo, soluzioni e prestazioni ancora più elevate.

1.2.7 Da competizione

Ultima ma non certo per importanza, la categoria delle auto da competizione. Qui risiedono tutti quei mezzi derivati dalla produzione per l'uso stradale e non (prototipi), che vengono utilizzati sui tracciati di tutto il mondo.



Figura 1.7: Esempio di auto da Competizione

Questo genere di macchina non bada a compromessi e fa della ricerca della prestazione assoluta uno scopo di vita. Un'esempio sono le Formula 1 (in Figura 1.7 la Ferrari SF71H utilizzata nel mondiale 2017 - 2018): auto da più di 1000 cavalli, con rapporto potenza/peso superiore all'unità e soluzioni aerodinamiche portate all'estremo. Il costo per la progettazione di un mezzo simile supera di gran lunga svariati milioni di euro.

Grazie a questa breve carrellata sulle varie tipologie di auto in commercio oggi è stato possibile notare come all'aumentare delle potenze in gioco siano stati necessari un sempre maggiore impiego di soluzioni aerodinamiche per permettere al conducente di provare la miglior esperienza di guida. In questo scenario è possibile inserire il mezzo utilizzato per lo studio della tesi in essere.

1.3 ALFA ROMEO 4C

L'Alfa Romeo 4C è un modello commercializzato dal 2013 e nato nel rinomato *Centro Stile Alfa Romeo*. La scelta di utilizzare questo veicolo è stata dettata dall'esigenza di usufruire di un modello che adottasse alcune soluzioni aerodinamiche particolari (una su tutte il fondo piatto), tipiche di un'auto sportiva. Nella Figura 1.8 è riportato il modello *coupé* ma esiste anche la versione



Figura 1.8: Alfa Romeo 4C *coupé*

spider con tetto apribile: a causa della diversa (e più critica) conformazione geometrica della zona indicata nella Figura 1.9, si è optato per analizzare il modello classico con tetto rigido e fisso, in quanto sicuramente meno problematico dal punto di vista della separazione e generazione di vortici, non avendo il "gradino" presente nella zona cerchiata ma raccordandosi invece al vano motore, in modo fluido.



Figura 1.9: Alfa Romeo 4C spider

Un'altro motivo che ha portato alla scelta della 4C sono state le prestazioni e per questo, nel seguito, vengono illustrate le caratteristiche principali del mezzo.

1.3.1 Caratteristiche tecniche

L'Alfa Romeo 4C può essere considerata una rivisitazione in chiave moderna di alcune storiche sportive passate della casa milanese. Vanta soluzioni innovative a partire dal telaio, costituito da una monoscocca realizzata completamente in fibra di carbonio, del peso di soli 65 kg, secondo la recente tecnologia derivante dalla Formula 1 mentre le strutture anteriore e posteriore del telaio e la gabbia di rinforzo del tetto sono interamente in alluminio. La tecnologia utilizzata per la realizzazione della monoscocca è denominata pre-preg (pre-impregnato e formato da fibre unidirezionali) ed è abbinata a una lavorazione denominata "cocura" che permette di ottenere un unico pezzo, senza assemblaggi: si tratta di un brevetto Dallara utilizzato da quest'ultima proprio nella massima serie e al suo primo utilizzo su vetture non facenti parte del circus della F1. L'alluminio, nella riduzione del peso, ha un ruolo rilevante e riscontrabile nella monoscocca in carbonio: rappresenta il 38% del peso complessivo della vettura stessa, il quale raggiunge gli 895 kg. Questo viene utilizzato secondo un processo denominato Cobapress che combina i vantaggi della fusione con quelli della forgiatura ottenendo pezzi ad elevata densità. Il peso ridotto, ancor di più della potenza del motore, permette alla vettura prestazioni elevate e un comportamento stradale ottimale: il rapporto peso/potenza è di 3.85 kg/CV, mentre la distribuzione dei pesi è suddivisa in 40% all'anteriore e 60% al posteriore.

Caratteristica	Valore
Prezzo	80.000 Euro
Alimentazione	Benzina
Trazione	Posteriore
Cilindrata	$1742 {\rm cm}^3$
Motore	4 Cilindri in linea 16 valvole
Potenza	241 CV
Coppia	350 N m
Velocità max	259 km/h
0 - 100 km/h	4.5 s
Consumi (ciclo combinato)	14.7 km/l
Ingombri (lungh.×largh.×alt.)	$3990\times2000\times1180mm$
Posti totali	2
Serbatoio	54 L

Tabella 1.8: Caratteristiche tecniche Alfa Romeo 4C

Le sospensioni adottate sono a triangoli sovrapposti per l'avantreno, mentre per il retrotreno è montata un'evoluzione dello schema *McPherson*. Il sistema frenante prevede quattro dischi forati autoventilanti di tipo ibrido, con pinze *Brembo* in alluminio a quattro pistoncini sull'asse anteriore. Le piste frenanti sono realizzate in ghisa mentre le campane sono in alluminio, per risparmiare circa 2 kg su ogni ruota, oltre che per migliorare la frenata senza ricorrere a costosi freni in materiale composito. La carrozzeria è interamente in materiale composito di tipo *SMC (Sheet Moulding Compound)* ovvero un composito a bassa densità e alta resistenza che pesa il 20% in meno dell'acciaio. Per modellare paraurti e parafanghi si è invece optato per il *PUR-RIM, il poliuretano iniettato* che pesa sempre il 20% in meno dell'acciaio e può essere sagomato anche nelle complesse forme delle estremità dell'Alfa Romeo 4C.



Figura 1.10: Alfa Romeo 4C – Motore

La vettura è equipaggiata con un motore (riportato in Figura 1.10) in linea a quattro cilindri a ciclo Otto, turbocompresso con alimentazione a iniezione diretta, dotato di variatore di fase; è costruito integralmente in lega leggera, in modo da contenerne i pesi, e alloggiato in posizione centrale-posteriore trasversale. La cilindrata è di 1742 cm³, che eroga una potenza massima di 240 CV, per una coppia motrice massima di 350 N m di cui l'80% disponibile già a 1700 giri/minuto; questo garantisce, in base ai dati forniti dalla casa, oltre 255 km/h di velocità massima e una accelerazione da 0 a 100 km/h in 4.5 s. La trasmissione è gestita da un cambio a doppia frizione a secco Alfa Romeo *TCT* gestibile in modalità sequenziale e per il quale è prevista la funzione *Launch Control*². La trazione è posteriore e la gestione avviene tramite il manettino Alfa Romeo DNA. Il propulsore è realizzato interamente in alluminio, materiale che permette al gruppo motore e cambio di contenere il peso entro i 135 kg.

Nota finale sugli interni, dove l'abitacolo (Figura 1.11) rispecchia l'indole sportiva della vettura: si presentano infatti essenziali, esaltando la sportività e la leggerezza del veicolo. Andando in ordine, la plancia – rivolta verso il guidatore – presenta due bocchette circolari; subito dopo i comandi della radio e infine quelli del climatizzatore. Il volante – a due razze e con la corona appiattita in basso – è impreziosito da impunture fatte a mano, con colore a contrasto. Altro richiamo alle corse si ha nei due sedili a guscio con il logo della casa di Arese impresso sui poggiatesta, inframezzati dal tunnel centra-

² Il *Launch Control* è un ausilio elettronico sviluppato per aiutare i piloti di auto da corsa ad accelerare rapidamente da fermo evitando il pattinamento delle ruote motrici.



Figura 1.11: Alfa Romeo 4C – Abitacolo

le dove vi sono i tasti di gestione del cambio a doppia frizione Alfa Romeo TCT e il manettino Alfa Romeo DNA (che sulla 4C prevede, oltre i settaggi *Dynamic, Normal e All Weather,* per la prima volta anche la nuova modalità Race che integra il già citato *Launch Control*). Completano infine il quadro generale di sportività degli interni, la fibra di carbonio a vista sui battitacchi e le esili maniglie delle portiere in pelle. L'innovativo quadro strumenti a colori da 7 pollici, completamente digitale e personalizzabile (in base alle posizioni del manettino DNA), costituisce il fulcro ideale dell'abitacolo, interamente disegnato intorno al pilota.

1.3.2 Peculiarità aerodinamiche

Dopo una prima introduzione sulle caratteristiche tecniche del veicolo, si vogliono identificare le soluzioni aerodinamiche (e non), che maggiormente influenzeranno i risultati attesi.

FONDO PIATTO E DIFFUSORE Il primo su tutti è la presenza del fondo piatto e di un estrattore. Tale soluzione deriva direttamente dal mondo delle corse e ha lo scopo principale di aumentare il carico aerodinamico deportante della vettura. Il fondo piatto cerca di eliminare ogni rugosità e/o interferenza dovuta alla presenza di tubazioni, cavi o convessità geometriche, livellando il tutto con una lastra piana. Tale dispositivo permette di mantenere il più possibile laminare il flusso al di sotto del veicolo riducendo di fatto la resistenza. Inoltre, mantenendo il flusso laminare, consente al diffusore di lavorare nelle migliori condizioni.

Il diffusore è disegnato come una sorta di scivolo rovesciato; visto in uno spaccato laterale ha l'andamento di un'ala capovolta, che aumenta di volume lungo la sua estensione, da praticamente piatto all'inizio, a estremamente scavato e rialzato nella parte finale, accorgimento concepito per creare il vuoto necessario alla compressione dell'aria proveniente da sotto la vettura. La pendenza di risalita del diffusore è importante, e deve avere un cambiamento graduale dell'angolo di inclinazione per impedire che il flusso d'aria si separi bruscamente dalla parte superiore e sui lati. All'interno di molti estrattori sono anche montate paratie verticali per convogliare l'aria e suddividere in modo omogeneo le zone di compressione. Questo è uno degli elementi aerodinamici che contribuiscono a generare l'effetto suolo. Il dif-



Figura 1.12: Alfa Romeo 4C – Fondo piatto e diffusore (ANSA)

fusore crea un'area di bassa pressione sotto il corpo vettura in movimento: esso accelera il flusso d'aria sotto la macchina e ne riduce la pressione, creando una differenza di pressione tra le superfici superiore e inferiore dell'auto. In una vettura in movimento, il flusso d'aria che passa nella parte sottostante dell'avantreno accelera, ma arrivando al diffusore trova una zona di bassa pressione e si espande ritornando a velocità normale, producendo deportanza in maniera più efficiente, riducendo la resistenza rispetto ad un alettone. L'aumento del carico deportante permette di migliorare la trazione degli pneumatici con il manto stradale aumentando l'aderenza.

SPOILER, MINICONNE E PRESE D'ARIA Oltre a quanto appena visto, un piccolo ritaglio, non meno importante, meritano le altre soluzioni aerodinamiche adottate dalla macchina. Nella zona posteriore, tramite una curvatura del profilo del baule si è ricavato un piccolo spoiler che oltre ad avere una funzionalità estetica, rendendo di gran lunga più accattivante il mezzo, permette di incrementare il carico aerodinamico.



Figura 1.13: Alfa Romeo 4C – Spoiler

In generale, però, va fatto notare che la maggior parte del carico viene

ottenuto dal fondo e anche sulle macchine da corsa gli alettoni e gli spoiler vengono utilizzati principalmente per trovare un equilibrio dei carichi tra la parte anteriore e quella posteriore, in quanto aumentano anche la componente di resistenza all'avanzamento. Certamente non è il caso del piccolo spoiler adottato sulla 4C ma è bene ribadire tale concetto. Sempre grazie alla Figura 1.13, è possibile apprezzare le minigonne laterali sotto le portiere. Le minigonne nella maggior parte delle installazioni stradali risultano essere un componente per lo più estetico mentre nelle auto da competizione (regolamenti permettendo) diventano un dispositivo molto importante per la stabilità del veicolo perché aumentano l'effetto suolo tra vettura e fondo stradale. La loro funzione è prevalentemente quella di sigillare meglio il fondo vettura con il suolo, separando così l'aria sotto al veicolo da quella esterna (le quali si trovano a pressioni diverse), contribuendo in questo modo ad aumentare il carico deportante complessivo. Infine una nota sulle due prese d'aria collocate nella zona posteriore sulle fiancate laterali in quanto esse servono a seconda del lato a funzioni diverse:

- Lato guida (sinistra): l'aria viene convogliata verso l'intercooler che raffredda l'aria in ingresso all'aspirazione;
- Lato passeggero (destra): l'aria viene convogliata in parte dentro una tubatura che termina sulla turbina, raffreddandola, e in parte nel vano motore permettendo un aumento del ricircolo aria.



Figura 1.14: Alfa Romeo 4C – Presa d'aria intercooler

TRAZIONE E MOTORE POSTERIORE Infine, un discorso a sé per il reparto meccanico: sulla 4C è installato un motore turbocompresso di bassa cilindrata (rispetto a quelli installati comunemente su vetture sportive). Ciò significa che l'elevata potenza è data dall'aver spinto ogni componente del motore al limite: questo le consente di contenere di molto le masse rendendo il mezzo davvero prestazionale. Al fine di mantenere minime le dimensioni e per questioni di ripartizione dei pesi, il motore è stato collocato dietro l'abitacolo riducendo per esempio le dimensioni della linea dello scarico. Dal punto di vista dello studio affrontato tale configurazione non risulta essere la più significativa, in quanto non si da tempo al flusso di interagire con le zone più calde della macchina rispetto ad una configurazione con motore e trazione anteriore, essendo questi praticamente già nella scia. Tuttavia, il radiatore, deve essere installato nella parte frontale della macchina per avere il miglior scambio termico possibile: questo, unito al fatto di avere un convogliatore che scarica direttamente i rilasci termici nel fondo piatto, permette di influenzare notevolmente i risultati, come si vedrà nel prosieguo della trattazione (Figura 1.15).



Figura 1.15: Alfa Romeo 4C – Convogliatore radiatore (ANSA)

Infatti, quando sia nel radiatore che nell'intercooler arriva aria ad alta velocità (ed eventualmente il condensatore – considerato spento per non avere carichi al motore dovuti al reparto clima), essi devono smaltire notevoli potenze termiche, viste le potenze meccaniche a disposizione.

1.4 TIPOLOGIE DI CALCOLI CFD APPLICATI NEL SETTORE AUTOMOTIVE

Prima di passare all'analisi del modello adottato, software e quant'altro, risulta necessario capire lo stato dell'arte attuale in campo di analisi e calcoli CFD utilizzati nell'industria dell'autoveicolo. Nello specifico si possono ricavare 3 macroaree di interesse e sviluppo:

- *Analisi aerodinamica,* intesa come studio del flusso esterno e/o interno che coinvolge il veicolo;
- *Analisi termica,* intesa come studio di *thermal protection* e calcolo di portate;
- *Analisi aeroacustica,* intesa come lo studio atto a rimuovere o ridurre disturbi legati alla rumorosità del veicolo in una corrente fluida.

Nel seguito si andranno ad analizzare queste aree di lavoro evidenziandone le attività tipiche in ottica CFD.

1.4.1 Analisi aerodinamica

L'analisi aerodinamica racchiude, per il settore automotive, lo studio del flusso d'aria all'esterno del veicolo con l'obiettivo di calcolare principalmente i coefficienti di resistenza e di portanza (nel seguito chiamati rispettivamente C_x e C_z , in accordo con gli assi *body* del veicolo) sviluppati complessivamente dal mezzo. Tale applicazione risulta fondamentale per la riduzione della resistenza aerodinamica e per garantire (sui mezzi ad alte prestazioni) una migliore stabilità aumentando, come visto in precedenza attraverso opportune soluzioni, il carico deportante e quindi l'aderenza tra fondo stradale e pneumatici. Ad oggi, grazie alle potenze di calcolo, è possibile provare diverse configurazioni nel giro di poche ore, riuscendo a determinare - in modo esponenzialmente più veloce rispetto alle prove sperimentali in galleria quale configurazione sia la migliore dal punto di vista aerodinamico o eventualmente proporre modifiche geometriche per migliorare i risultati ottenuti. Inoltre, molto spesso vengono utilizzati i dati provenienti dal post-process dei casi simulati per ottenere il valore (più o meno indicativo) dei carichi aerodinamici agenti su una determinata superficie (e.g. montanti) in modo da adottare eventuali migliorie in termini di riduzione dei costi. Attualmente si è soliti non considerare l'aspetto termico nel computo di tali coefficienti, essendo le prove di galleria svolte con la macchina in condizioni "fredde": ciò significa che i risultati ottenuti a calcolo e successivamente confrontati con i dati sperimentali trovano riscontro validando i modelli fisico-numerico adottati, ma tale *modus operandi* non rispecchia le vere condizioni operative, dove la macchina ha importanti rilasci termici nell'aria. Lo scopo di tale Tesi è proprio quello di verificare se un modello termico completo porti a delle variazioni significative sui coefficienti calcolati trascurando l'energia scambiata. Infine, non meno importante, le analisi CFD vengono utilizzate anche per determinare la circolazione d'aria all'interno dell'abitacolo: questo genere di soluzione potrebbe sembrare più semplice, ma a causa delle difficili geometrie presenti all'interno dell'abitacolo si creano mesh di superficie (e quindi

poi di volume) di notevoli dimensioni con un numero di celle di calcolo non banale, causando richieste in termini di potenza di calcolo talvolta superiori a quelle richieste per un calcolo esterno. Ultima nota riguardo le simulazioni esterne, riguarda le condizioni di velocità: in Europa (segmento EMEA, *Europe, Middle East, and Africa*) le varie case automobilistiche sono solite testare i loro mezzi sia tramite CFD che in galleria alla velocità di 140 km/h in modo da avere risultati confrontabili tra loro in quanto rappresenta anche il limite di velocità stradale più diffuso (Germania a parte).

1.4.2 Analisi termica

L'analisi termica è un campo di forte applicazione nel settore dell'autoveicolo nei termini di studio e protezione termica (thermal protection): in tutte le zone critiche a contatto con fonti di calore (turbina, scarico, radiatore...) è necessario prevedere la presenza di determinati materiali protettivi e/o isolanti; per citare un esempio, nella zona terminale dello scarico l'alluminio del tratto finale può raggiungere temperature superiori ai 250 °C: per questo motivo è necessario prevedere il comportamento dei componenti nelle vicinanze, come il paraurti, che soggetti a tali temperatura potrebbero fondersi se non opportunamente distanziati, isolati o raffreddati. Per questo motivo si cerca di trovare sempre la miglior soluzione evitando di aggiungere materiale assorbente in eccesso (con un aumento dei costi di produzione dell'auto). Talvolta sono necessarie (come nel caso della 4C) delle soluzioni particolari successive alla messa in produzione a causa dell'insorgere di problemi che in fase di progetto o di validazione non sono emersi, ma fondamentali per il corretto funzionamento. Inoltre, sempre nell'ambito dello studio termico, rientrano di diritto tutti gli studi di portate e calore scambiato dalle superfici radianti: è infatti fondamentale che in ogni condizione il propulsore (nonché l'impianto clima) lavori nelle giuste condizioni in termini di temperatura d'esercizio. Vengono per questo motivo simulati i flussi d'aria di scambio sulle superfici radianti, la ventola supplementare e ogni genere di flusso che viene interessato da uno scambio di calore.

1.4.3 Analisi aeroacustica

L'analisi aeroacustica invece è un oggetto di studio di recente introduzione e per certi versi ben più complicato rispetto ai due casi precedenti.



Figura 1.16: Dettaglio tetto apribile Fiat 500 L

In un veicolo tradizionale con motore endotermico, pensando alla rumorosità, la si collega immediatamente allo scarico: normalmente la progettazione di questo componente viene affrontata in stretta collaborazione con aziende esterne aventi una consolidata esperienza nella realizzazione di tale dispositivo, mentre normalmente lo studio aeroacustico interno viene effettuato per ridurre la rumorosità avvertita all'interno dell'abitacolo. Infatti ci si concentra maggiormente sullo studio (ed eventualmente modifica) di determinate superfici che creano separazione e quindi generazione di vortici che a specifiche velocità (con corrispettiva frequenza di rilascio) entrano nel campo dell'udibile rendendo fastidiosa l'esperienza di guida. Ciò significa che l'attenzione si sposta per natura sugli specchietti, montanti e antenna radio (sul veicolo convenzionale) oppure sul parabrezza (nel caso di un veicolo decapottabile) a causa del buffeting3. Questo problema si verifica in tutte le zone dell'auto aperte (come anche i tettucci apribili) che a velocità sostenuta (e.g. in autostrada) causano la generazione di vortici con conseguente produzione di rumore. La soluzione che si ricava da queste analisi permette di rivedere la geometria in modo da ridurre i singoli vortici di ampia intensità con vortici di dimensioni ridotte, attenuando (e persino eliminando) l'eventuale problema. Come visibile nella Figura 1.16, si nota davanti al tettuccio apribile un sistema "frangivento" che riduce il rumore generato proprio dal fenomeno sopra descritto.

³ Il *Buffeting* è quel fenomeno che si genera a causa della presenza di una zona concava incontrata dal fluido (e.g. apertura di un finestrino durante un tratto autostradale) che origina un rumore simile a quello udibile dalle pale di un elicottero.

2 | CASO STANDARD: MODELLO E RICHIAMI TEORICI

In questo Capitolo, verrà illustrato il modello utilizzato per il calcolo dei coefficienti aerodinamici senza l'influenza dell'energia termica rilasciata dal veicolo nelle condizioni operative. Questa sarà la base di partenza per comprendere le differenze con il caso accoppiato, sia in termini di modello che di risultati ottenuti.

2.1 SOFTWARE E HARDWARE UTILIZZATI

Prima di affrontare ogni peculiarità delle scelte che hanno portato ai risultati descritti nei prossimi Capitoli, si ritiene doveroso descrivere i *software e l'hardware* che hanno reso possibile lo svolgimento di questo studio.

2.1.1 Software

Tralasciando il pacchetto *Office* di Microsoft utilizzato (nello specifico la suite *Excel*) per il *post-processing* dei dati, le analisi sono state effettuate utilizzando tre programmi:

• ANSA V. 17.1.1 – Multidisciplinary CAE pre-processing.

ANSA è un software sviluppato e commercializzato dalla *BETA CAE Systems* che permette di effettuare tutte le operazioni preliminari di *premeshing*, quali l'importazione di geometrie, e di lavorarle sia in ottica CAD che FEM, ottenendo alla fine una mesh perfettamente esportabile su praticamente qualsiasi programma CFD. Nello specifico, ANSA è uno strumento avanzato di pre-elaborazione CAE multidisciplinare che fornisce tutte le funzionalità necessarie per la creazione di modelli completi, grazie alla sua vasta gamma di funzioni e strumenti che soddisfano le esigenze di tutti gli utenti.

• STAR-CCM+ V. 10.06.009 – Multidisciplinary CFD platform for simulations.

STAR è un codice di calcolo CFD commercializzato dalla *Siemens*, che permette di simulare i progetti nelle loro condizioni reali di impiego. I campi di applicazione sono numerosi: dalla fluidodinamica all'aeroacustica passando dai fluidi bifasici. STAR-CCM+ rappresenta di fatto, una piattaforma multidisciplinare in grado di assolvere in maniera completa qualsiasi simulazione che le viene sottoposta, permettendo un preciso controllo dei parametri del modello sia in termini di schematizzazione spaziale e volendo temporale in casi non stazionari, che di modello risolutivo (fisica imposta, condizioni al contorno...).

• TAITherm V. 12.5.1 – Thermal modeling software

TAITherm è un software di proprietà di Thermoanalytics e rappresenta

uno dei programmi più completi e flessibili nel campo della modellazione termica. Questo programma sfrutta un'approccio ad elementi finiti di tipo multifisico per la risoluzione della conduzione termica, radiazione e convezione in condizioni sia stazionare che transitorie.

Sia nel caso di calcolo "freddo" che nel caso accoppiato, i modelli sono stati preparati utilizzando il software ANSA e successivamente importati in STAR. Nel caso accoppiato la procedura è stata leggermente differente e verrà in ogni caso esaustivamente spiegata nel seguito della Tesi. Infine sono stati utilizzati altri software *open-source* per l'accesso e caricamento di file sul server centrale di calcolo (con sistema operativo *Linux*).

2.1.2 Hardware

Dal punto di vista hardware, fatta eccezione per il notebook personale utilizzato per la sola redazione del presente Testo, negli uffici di FCA dove si è svolta l'attività di Tesi, sono state fornite diverse risorse hardware, oltre alle licenze dei software precedentemente citati. Nello specifico si riportano in un rapido elenco, le macchine e le rispettive caratteristiche:

- Postazione PC con un server locale HP z440 con processore *xeon*, 64 GB di *RAM* e 100 GB di spazio libero a disposizione. Il sistema operativo usato è *Windows* 7. A completamento, mouse, tastiera e schermo LCD.
- *Server di calcolo* o *Cluster*, su piattaforma *Linux*, con a disposizione del reparto CFD ben 4396 processori dedicati al solo calcolo e di un'altra ottantina per le sole operazioni di visualizzazione delle simulazioni o lancio di *mesh*. Lo spazio di allocazione a disposizione è stato sicuramente maggiore del necessario e ha permesso di archiviare senza problemi gli oltre 2 TB di dati ricavati da questa Tesi.

Infine, un'ultima nota riguarda la suddivisione dei processori: ogni utente (compresi gli stagisti e i tesisti) non ha limitazioni sul numero di processori utilizzabili, compatibilmente con il carico di lavoro del reparto (in termini di consegne e scadenze), ma usualmente il numero di processori minimo consigliato è di 336 o multipli. Tale numero deriva da un *best fit* tra numero di processori, licenze disponibili e velocità di calcolo. Tutta l'attività svolta è stata eseguita utilizzando 336 processori per la parte di sola aerodinamica e di 672 nei casi accoppiati, per evitare di intasare inutilmente la coda di lancio.

2.2 ANALISI PRELIMINARE - ANSA

Come detto a inizio capitolo, tutta la fase di preparazione dell'Alfa Romeo 4C è stata effettuata su ANSA [2], importando le geometrie dell'intero veico-lo (escluso l'abitacolo) dal server CAD centrale. Il programma permette di



Figura 2.1: Modello completo su ANSA

suddividere ogni componente attraverso un nome diverso (*PiD*) o di racchiudere dentro ad un'unica *PiD* diversi componenti che svolgono la stessa funzione (ad esempio le mollette reggi cavo o tubazioni...). Una volta suddiviso in maniera corretta tutto l'assieme, assegnando un etichetta al nome che li renda raggruppabili per sotto assieme (e.g. tutte il sotto sistema elettrico con il prefisso ELE-<nome componente>...) e depurato di parti eccessivamente complicate dal punto di vista geometrico (che in sede di mesh avrebbero causato problemi di intersezione di celle o altre problematiche numeriche) e poco funzionali dal punto di vista simulativo (viti, rondelle...) si è proceduto nel seguente modo:

- Si è utilizzato un approccio di tipo CAD per tutte le superfici esterne, in quanto garantisce la miglior rappresentazione del modello al vero, in termini di precisione su bordi e curvature;
- Si è utilizzato invece, un approccio di tipo FEM su tutti i componenti del vano motore, sfruttando la funzione *wrapping*. Sostanzialmente il programma riconosce la superficie esterna dei componenti che si vogliono "wrappare" e li rende continui superficialmente. In questo modo le geometrie mantengono una forma molto simile alle originali ma vengono semplificate di tutte quelle concavità e/o convessità, che sarebbero fonte di errore nella mesh di volume una volta esportate, con conseguenti risultati non convergenti.

Una volta sistemato il modello sotto questo punto di vista si ottiene un veicolo misto CAD-FEM che non potrebbe essere esportabile in quanto non completo in tutte le sue parti di elementi mesh. Per questo motivo si passa dalla sezione "Topologica" a quella dedicata alla mesh e impostando su ciascun perimetro di ogni superficie la distanza dei nodi di mesh (più o meno fitta a seconda della criticità della zona) si ottiene una prima versione interamente meshata del modello. Per le analisi aerodinamiche si è utilizzata una mesh a triangoli (tipo *TRIA*). Giunti a questo punto, il software permette di controllare numerosi parametri di qualità della mesh ottenuta e nello specifico ci si è focalizzati su:

- **Geometria**, intesa come l'assenza di eventuali superfici aperte (caratterizzate da un bordo rosso) o triplicemente connesse (caratterizzate da un bordo azzurro). Queste situazioni sono ammesse in soli due casi: le prime in presenza di componenti di tipo *baffle* ossia rappresentate come superfici sottili. Questo è il caso dei ripari calore o degli insonorizzanti. Il secondo caso invece è ammesso solamente per tutte quelle superfici fittizie nel quale si vuole calcolare un dato parametro (e.g. portata in un tubo) e per tale motivo risulta più comoda esportare un'interfaccia geometrica nel programma CFD in modo da potergli indicare successivamente le quantità da controllare su quella data superficie;
- Sharp edges, intesi come due o più celle di mesh che creano punti fortemente concavi o convessi (cuspidi). Può succedere infatti, che in determinate zone del veicolo la mesh si poggi su una geometria (CAD o FEM) che termini con un bordo sottile: il programma calcola l'angolo tra le normali delle coppie di celle e determina le zone critiche in funzione di un angolo di soglia imposto dall'utente;
- Intersections, intese come la compenetrazione di due o più celle a causa delle dimensioni di mesh. Nonostante la geometria di partenza fosse priva di queste, la creazione della mesh può portare a situazioni simili, facilmente risolvibile imponendo manualmente i giusti vincoli o creando apposite spaziature.
- **Self proximities**, intese come la distanza minima tra due (o più) celle. Sono molto simili ai precedenti, ma vanno controllate anche tutte le celle che si trovano l'una dalle altre ad una distanza inferiore di un certo valore imposto dall'utente.

Una volta corretti tutti questi "errori", si passa ad un'ulteriore controllo di qualità sulle singole celle attraverso la visualizzazione degli *OFF*¹. Per il caso aerodinamico disaccoppiato è sufficiente imporre il controllo della *skweness* o asimmetria: tale parametro indica di quanto una cella è distorta rispetto alla forma standard o ad una forma normalizzata. Il valore ideale è 0 mentre il peggior valore ottenibile dal rapporto è 1. Nel caso bidimensionale in cui si sta lavorando (essendo elementi superficiali) si è scelto come valore di soglia 0.85. A questo punto la vettura risulta completamente "meshata" ed è priva di errori. Nella Figura 2.1, viene riportato il modello completo su ANSA allo

¹ Nella visualizzazione mesh, una volta settati i parametri di qualità, il programma individua tutte le celle che non li rispettano e li evidenzia a video.

stato appena descritto. L'intero veicolo, privo di galleria, è formato da un totale di circa 20 milioni di celle, con una dimensione di quasi 2 GB. Prima di procedere è però utile porre l'attenzione su due altre importanti lavorazioni compiute sul modello.

2.2.1 Masse radianti

Tutte le masse radianti (radiatore, intercooler², condensatore e ventola), prima di essere esportate su STAR devono subire un processo a parte: questi componenti vanno modellati attraverso la creazione di una mesh di volume con elementi QUAD (sostanzialmente dei parallelepipedi a base quadrata). Questo perché una volta importati sul programma CFD il flusso che li attraverserà sarà soggetto ad una legge di caduta di pressione ricavata dai *data sheet* dei componenti installati sulle auto. In questo modo si simula al meglio la situazione reale. Nella Figura 2.2 sono riportate le discretizzazioni del



Figura 2.2: Masse radianti modellate su ANSA

condensatore dell'impianto clima, il radiatore e la ventola di raffreddamento. Nonostante il condensatore non darà un contributo in termini termici (dato che non verranno simulati carichi dovuti all'impianto di climatizzazione), viene comunque modellato per imporre al flusso un certo Δp di caduta dato dal passaggio attraverso. Discorso diverso per la discretizzazione della ventola: questa, nelle simulazioni a bassa velocità (in ottica di analisi termiche), viene simulata accesa in termini di Δp generato tra ingresso e uscita, con una conseguente rotazione del flusso all'uscita dato dal movimento rotatorio della ventola stessa sul fluido.

² Qui non riportato graficamente, per semplicità, essendo posizionato lontano dalle altre masse radianti.

2.2.2 Ruote

Il cerchione, insieme al pneumatico, influenza moltissimo la soluzione aerodinamica se considerato in rotazione o meno.



Figura 2.3: MRF - ANSA

Per questo motivo, volendo avere dei risultati il più coerenti possibili con i valori al vero è necessario attuare uno stratagemma: il cerchione nella sua rotazione (funzione della velocità di test) trascina con sé un certo volume di aria contenuto tra le razze dello stesso. Per simulare questa condizione allora si va a chiudere la porzione vuota del cerchione identificando tale zona con una PiD specifica "MRF-" ad indicare la porzione d'aria che dovrà essere messa in rotazione su STAR attraverso l'attivazione della relativa funzione (sistema rotante – *Moving Reference Frame*). Come si nota dalla Figura 2.3, il diverso colore delle zone intra-razze rispetto al resto del cerchione indica proprio la differente collocazione in PiD diverse.

2.3 MACRO

Prima di passare all'analisi di quanto eseguito su STAR, è necessario specificare che nonostante le prime simulazioni di prova (non riportate in quanto non significative) siano state eseguite manualmente impostando (da normativa interna FCA) tutti i parametri di mesh, fisica e solutore è doveroso far notare la potenzialità dei sistemi ANSA e STAR. Questi due software permettono l'integrazione di *script* scritti rispettivamente in *Phyton* e *Java* che rendono possibile l'automatizzazione nel settaggio di tutti i parametri di simulazione. Ciò significa un notevole risparmio di tempo in quanto direttamente dalla finestra di ANSA è possibile far eseguire lo script che opportunamente settato permette di ottenere un file *.sim* al 99%³ pronto per essere lanciato sul *cluster*. Nello specifico, attraverso la macro, si impostano:

- Velocità di test;
- Tramite le PiD si indicano le zone più critiche come specchietti e griglie dove in automatico verranno creati box di infittimento con il fine di avere una mesh più accurata; sempre tramite le PiD si imposta anche la rotazione degli MRF;
- Il numero massimo di iterazioni;
- I valori di perdita di pressione dovuto alle masse radianti (questo punto sarà meglio analizzato in seguito);
- La possibilità sempre tramite la selezione delle PiD di mettere in assetto la vettura, ovvero regolare l'altezza da terra⁴;
- Infine, la creazione della galleria del vento fittizia, composta da *pavimento, inlet, outlet e muri laterali,* corrispondente al volume di calcolo su STAR.

Seneral W											
	nd Tunnel	Ride Height	Wheels	Heat exchangers	Thermal	Refinements	Run	Workflow	Settings		
Model Toforma	tion										
Hoder a Hornie											
Model name:	960										
Engine name:	1800-TBI										
Wheel size:	R 19										
Comments:	V130										
Simulation Set	up										
Template:	C0061 - Ex	ternal Aero-Dvn	mics - RANS	- StarCCM+ - Trim							
Notes											

Figura 2.4: Finestra di comando della Macro

³ Nonostante il processo automatizzato, è sempre buona norma aprire il file e controllare che tutto sia in regola con quanto impostato.

⁴ Questo passaggio risulta più delicato in quanto, dato un punto di riferimento, è necessario indicare quali componenti seguono una traslazione rigida (i.c. ruota) e quali devono essere soggetti a *morphing*, ovvero a deformazione.

Avviato il processo, come detto, la macro salva un file *.sim* contenente tutte le geometrie importate da ANSA che verrà aperto, controllato e successivamente messo in coda di lancio. Una volta terminato il processo di mesh e calcolo, la macro si occupa di effettuare un primo *post-process* dei dati più rilevanti creando un file Excel e diverse immagini utili alla comprensione dei dati ottenuti. Ovviamente per analisi particolari è possibile aprire la simulazione completata e procedere in modo classico.

2.4 STAR CCM+

Come spiegato nella Sezione 2.3, ottenuto il file *.sim* questo viene aperto e controllato nelle sue impostazioni. Va da sè che tali impostazioni sono state assunte come base di partenza essendo il modello attualmente utilizzato dal reparto e validato dalle prove sperimentali; solo in determinati casi per quanto concerne la qualità della mesh, si è intervenuti modificandone i parametri. A livello di solutore invece si è deciso di utilizzare quanto impostato poiché, come detto, la controprova sperimentale e la loro esperienza quotidiana ne consolida l'utilizzo [3].

2.4.1 Mesh

Le prime impostazioni controllate riguardano l'importazione delle geometrie (come parti) e la creazione dei corrispettivi volumi di raffinamento. La normativa interna infatti prevede un certo numero di boxes che servono ad indicare al software la dimensione di mesh che si vuole ottenere in una data zona, precedentemente indicata nella macro tramite la selezione delle PiD corrispondenti. Per esempio, una griglia anteriore sarà soggetta a forti gradienti di pressione e per questo motivo dovrà avere una taglia di mesh ben più fitta rispetto al campo di scia lontano dalla macchina. Inoltre va fatto notare che qualora uno o più box di raffinamento vadano ad intersecarsi, STAR assume quello con taglia di mesh inferiore come principale e successivamente aumenta le dimensioni con un fattore di crescita deciso opportunamente dall'utente e gestito dagli algoritmi del software stesso (Surface growth rate impostato generalmente su "slow"). In questo modo si ottiene una sorta di effetto "matrioska" che permette di far diminuire o aumentare in maniera fluida e lenta le dimensioni delle celle di calcolo. Definito questo concetto, le impostazioni di mesh risultano divisibili in:

- *Custom controls,* che seppure vengano impostati successivamente al caso *Default,* in questa trattazione per semplicità espositiva, verranno trattate prima, in quanto più semplici da comprendere. Una volta decise le impostazioni di base, STAR permette di andare a specificare alcuni parametri di mesh in funzione della superficie o del volume che in determinati casi richiede un trattamento speciale in termini di dimensione delle celle oppure del numero di *prism layer,* i quali saranno spiegati nel seguito;
- *Default*, che rappresentano tutte le impostazioni di base dove non specificato diversamente dai *custom controls*. Qui vengono specificati tutti
i parametri tra cui la *base size* o dimensione di base della mesh da cui (tramite valore percentuale relativo) si va ad infittire o meno nelle impostazioni personalizzate appena viste.

Esposta questa prima differenziazione, i parametri da impostare sono dapprima le impostazioni di mesh che prevedono:

- "Active surface remesher" e "Automatic surface repair" i quali permettono di utilizzare la mesh importata da ANSA come base di appoggio in termini di nodi, ma utilizzando i box di infittimento si ottiene un best fit tra le varie taglie di mesh imposte. La seconda opzione consente al programma di risolvere eventuali criticità (intersezioni ...) che potrebbero insorgere in seguito proprio al processo di rigenerazione della mesh;
- *"Trimmer"*, in quanto utilizzando prevalentemente una mesh esaedrica risulta maggiormente efficiente rispetto alla *Poliedrica*, garantendo il riempimento di grandi volumi utilizzando meno memoria per singola cella;
- "Prism layer", utili per la gestione e descrizione dello strato limite turbolento. Proprio l'intervento su questo parametro ha permesso di far convergere i risultati (soprattutto in termini di C_z) all'aumentare della velocità come si vedrà nel Capitolo 3;

e successivamente specificare i valori di:

- *Base size,* ovvero la dimensione di base del lato della cella di calcolo. Poiché tutti i valori personalizzati (*custom controls*) sono dati come valore percentuale relativo rispetto a tale parametro, modificandolo si ottiene una variazione (più o meno fitta) della mesh finale. Proprio tramite la modifica di questo parametro che si è analizzata la convergenza dei risultati al variare della mesh, come analizzato nel Capitolo 3. Di base, la normativa in FCA prevede una dimensione pari a 1 cm con un raffinamento che arriva nelle zone più critiche pari al 25%, mentre in campo lontano si dilata fino al valore di 6400% (corrispondente alla taglia di mesh che si ha per esempio vicino alle pareti della galleria virtuale).
- *Prism layer*, come anticipato prima, rappresentano una schematizzazione prismatica della zona vicina a parete. Lo strato limite viene gestito dal programma seguendo i parametri:
 - Spessore, inteso come distanza totale dalla superficie alla fine dello strato limite. Da normativa, di default è inserito il valore 8 mm;
 - Altezza del primo prisma, responsabile del valore di Y⁺ a parete.
 Da normativa interna il valore di default è pari a 0.05 mm;
 - Numero di prismi, responsabile della progressione geometrica di crescita. Infatti, mantenendo l'altezza costante, un numero maggiore di prismi permette un fattore di crescita più lento ma causa una aumento di costo computazionale non indifferente. Da normativa interna il valore di default è pari a 10;



Figura 2.5: Rappresentazione dei prism layers

• Altri parametri di gestione del fattore di crescita sia per la superficie che per il volume, curvature...

Una piccola nota ancora sui *prism layer*: questi sono di default impostati a 10 ma vengono portati ad 1 in tutte le zone a bassa velocità come il vano motore o nelle zone di interfaccia quali le griglie. Questo perché il flusso in quelle zone è molto lento e causerebbe un solo aggravio in termini di calcolo e, poiché a differenza della geometria esterna il vano motore è decisamente più complesso geometricamente, con il conseguente problema della creazione di celle di scarsa qualità, si potrebbe arrivare ad un risultato non convergente. Nelle griglie, invece, essendo superfici fittizie (se non opportunamente modellate) non si ha generazione di un vero strato limite e quindi risulterebbe una schematizzazione errata. A conclusione, nella Figura 2.6 si riporta una visualizzazione dei box di infittimento automaticamente generati e manualmente aggiunti⁵, dal più fitto al più rado. Per questioni di risoluzione grafica e comprensione sono stati omesse le visualizzazioni dei boxes più grandi, i quali offuscherebbero il veicolo rendendo non particolarmente significativa la visualizzazione.

2.4.2 Fisica e condizioni iniziali

Per quanto riguarda il modello fisico applicato per il caso aerodinamico classico si sono utilizzati:

• *Cell Quality Remediation*, o modello di correzione della qualità delle celle consente di ottenere buone soluzioni anche in caso di mesh di bassa qualità. Tale modello identifica le celle problematiche utilizzando una serie di di criteri predefiniti (e.g. la *skewness* già vista in precedenza) e, una volta contrassegnate, modifica i gradienti calcolati in tali celle in

⁵ La macro è pensata per un modello classico con 3 montanti, motore anteriore... Per questo motivo sono stati aggiunti e/o modificati dei boxes nelle zone più critiche (e.g. prese d'aria posteriori) non presenti.



(c) Average

Figura 2.6: Boxes di infittimento

modo da migliorare la robustezza della soluzione. In generale, l'effetto della correzione della qualità delle celle è confinato nelle immediate vicinanza di celle di scarsa qualità o degeneri, in modo che l'influenza sull'accuratezza complessiva sia minima;

• *Constant density*, ovvero la densità viene considerata costante. Tale assunzione è motivata dal trovarsi in campi di moto del basso subsonico e quindi si trascurano gli effetti di compressibilità; • *Coupled flow,* o flusso accoppiato, prevede la soluzione delle Equazioni di *Navier-Stokes*:

$$\begin{split} & \frac{\delta\rho}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = \mathbf{0} \\ & \frac{\delta\rho \mathbf{V}}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) + \nabla \mathbf{p} = \nabla \cdot \mathbf{\tau} + \rho \mathbf{f} \\ & \frac{\delta E}{\delta t} + \nabla \cdot [(\mathbf{E} + \mathbf{p}) \, \mathbf{V}] - \nabla \cdot (\mathbf{\tau} \cdot \mathbf{V}) + \nabla \cdot \dot{\mathbf{q}} = \rho \dot{\zeta} + \rho \mathbf{f} \cdot \mathbf{V} \end{split}$$

qui riportate in versione differenziale e conservativa⁶, risolvendo in maniera congiunta l'equazione di continuità e di quantità di moto. La scelta di un modello accoppiato o no, dipende dalle condizioni al contorno del problema e dalla potenza di calcolo a disposizione. Infatti, se a livello di potenza disponibile non si hanno limitazioni (come nel caso di questa tesi) l'utilizzo di un modello simile garantisce una maggior robustezza soprattutto in ottica di comparazione con il modello avente il contributo termico. Infatti, come consigliato nella guida del software STAR, l'uso del modello coupled è da preferire sicuramente nei modelli compressibili, ma risulta una scelta più vantaggiosa anche nei modelli non compressibili in quanto consente di avere convergenza con un numero di iterazioni minore (potenza di calcolo permettendo). L'attivazione di questo modello permette di modificare più aspetti come il metodo di integrazione o la discretizzazione, ma sono lasciati impostati al valore di default (metodo implicito e discretizzazione al secondo ordine). Importante però, la scelta del modello di discretizzazione del flusso inviscido: qui è stato utilizzato il modello ROE FDS che si basa sullo schema Roe⁷ nella versione di *Weiss-Smith* [6][10];

- *Exact Wall Distance*: la *wall distance* è un parametro che rappresenta la distanza dal centroide della cella alla superficie (muro) più vicina con condizione al contorno *non-slip*. Tutti i modelli turbolenti richiedono questo parametro ed il software permette di scegliere tra un modello esatto (quello utilizzato) più accurato ma più lento rispetto al modello PDE (*Partial differential equation*) che utilizza una stima della distanza basandosi sull'equazione di Poisson [8];
- *Gas,* in quanto si utilizza come mezzo fluido l'aria. Vengono impostate tutte le proprietà dell'aria in termini di densità e viscosità dinamica;
- *Gradients*, dove viene specificato il modello ed i parametri di calcolo dei gradienti. Viene lasciato tutto nelle condizioni di default, fatta eccezione per il *Normalized Flat Cells Curvature Factor* che rappresenta il rapporto accettabile tra la tangente dell'angolo di *skewness* della cella e l'allungamento della stessa. Tale parametro viene portato al valore di 1E – 20;

⁶ Essendo il volume di controllo fisso e non in movimento.

⁷ Lo schema Roe è un risolutore approssimativo di Riemann, ideato da Phil Roe basato sullo schema di Godunov e comporta la ricerca di una stima del flusso di Godunov $F_{i+1/2}$ all'interfaccia tra due celle computazionali successive in un dominio computazionale spazio-temporale discretizzato.

- K-Epsilon Turbulence e Standard K-Epsilon Two-Layer, che rappresentano un modello di turbolenza a due equazioni in cui le equazioni di trasporto sono risolte per l'energia cinetica turbolenta K e il suo tasso di dissipazione ε [5]. Il modello standard con queste impostazioni viene combinato con l'approccio a due strati. I coefficienti nei modelli sono identici, ma il modello ottiene la flessibilità data dal metodo all y+ wall. Un metodo a due strati è un alternativa al modello a bassi numeri di Reynolds che permette di applicare il principio K-Epsilon al sottostrato viscoso. In questo approccio, il calcolo è diviso in due livelli. Nello strato accanto alla parete, il tasso di dissipazione turbolenta ε e la viscosità turbolenta μ_t sono specificate come funzioni di distanza del muro. I valori di ε specificati nello strato vicino a parete vengono miscelati senza intoppi con i valori calcolati dalla risoluzione dell'equazione di trasporto lontano da parete. L'equazione per l'energia cinetica turbolenta è risolta in tutto il flusso. Questa esplicitazione di ε e μ_t è probabilmente non meno empirica rispetto all'approccio con la funzione di smorzamento ed infatti i risultati sono spesso buoni se non migliori. In STAR, le formulazioni a due strati funzionano in maniera corretta se il valore di y⁺ è nell'intorno dell'unità o se superiore a 30. Tale punto sarà fondamentale nell'analisi di mesh. Anche qui i parametri sono stati lasciati a default, fatta eccezione per:
 - Realizability option, dove è stata imposta la Durbin scale limiter. I modelli a due equazioni prevedono una crescita importante dell'energia cinetica turbolenta del flusso nei punto di stagnazione. Questa crescita può avere un effetto negativo sul resto della soluzione e per superare tale criticità viene proposto un limite inferiore della scala temporale di turbolenza che impone il vincolo di "realizability" nella formula della viscosità parassita;
 - Il coefficiente di "realizability" viene per l'appunto modificato e passa al valore 1.2;
- *Two-layer all y+ wall Treatment,* approccio ibrido che cerca di mescolare i comportamenti dei trattamenti a parete (high and low y⁺) nel limite di mesh fini o grossolane. Fornisce inoltre risultati ragionevoli per le mesh intermedie in cui il centroide di cella ricade nel *buffer layer*. Inoltre contiene una condizione al contorno sulla parete per il tasso di dissipazione turbolenta che è coerente con la formulazione a due strati [7].
- Reynolds-Averaged Navier Stokes: si utilizza il metodo delle equazioni di Navier-Stokes mediate, ovvero dove le grandezze risultano non più istantanee, ma mediate in un certo periodo di tempo, sufficientemente piccolo rispetto ai fenomeni che si vogliono seguire, sufficientemente grande rispetto ai disturbi della turbolenza. Infatti non si vuole studiare la turbolenza innescata dal veicolo ma l'effetto complessivo, quindi la conoscenza delle grandezze medie risulta sufficiente per la soluzione del problema. Questo approccio consente una notevole riduzione dei tempi di calcolo, poiché le scale del moto medio sono molto più grandi di quelle delle fluttuazioni turbolente, tenendo sempre a mente

che sfruttando la decomposizione alla Reynolds, un moto turbolento può essere considerato come la sovrapposizione di un moto medio e di un moto fluttuante nel tempo. Le equazioni risultanti per le quantità mediate sono essenzialmente identiche a quelle originali, ad eccezione del fatto che viene aggiunto un termine nell'equazione di trasporto del momento. Tale termine è noto come il tensore degli stress di Reynolds, che ha la seguente definizione:

$$\mathbf{T} = -\rho \overline{\mathbf{V}' \mathbf{V}'} = -\rho \left(\begin{array}{ccc} \overline{u'u'} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{v'u'} & \overline{v'v'} & \overline{v'w'} \\ \overline{w'u'} & \overline{w'v'} & \overline{w'w'} \end{array} \right)$$

La sfida è quindi quella di modellare tale tensore degli sforzi di Reynolds in termini di quantità di flusso medio, e quindi fornire la chiusura delle equazioni di governo. In STAR-CCM+ vengono utilizzati due approcci:

- Modello di viscosità "Eddy";
- Modelli di trasporto dello stress di Reynolds.

Il primo modello usa il concetto di viscosità turbolenta μ_t nel tensore di Reynolds come una funzione delle quantità del flusso medio. Il modello più comune è conosciuto come *approssimazione di Boussinesq*:

$$\mathsf{T} = 2\mu_t \, \mathbf{S} - \frac{2}{3} \left(\mu_t \nabla \cdot \boldsymbol{\nu} + \rho \mathbf{k} \right) \mathbf{I}$$

dove S è il tensore degli stress:

$$\boldsymbol{S} = \frac{1}{2} \left(\nabla \boldsymbol{\nu} + \nabla \boldsymbol{\nu}^\mathsf{T} \right)$$

e la k è l'energia cinetica turbolenta. Mentre alcuni modelli più semplici si basano sul concetto di lunghezza di miscelazione per modellare la viscosità turbolenta in termini di flusso medio, i modelli di viscosità parassite in STAR-CCM+ vedono risolvere ulteriori equazioni di trasporto per le quantità scalari che consentono di ricavare la viscosità turbolenta μ_t . Questi includono anche il modello *K-epsilon*. Poiché l'assunzione che il tensore di Reynolds sia linearmente proporzionale alla velocità media è notoriamente poco precisa, alcuni modelli a due equazioni estendono l'approssimazione lineare per includere relazioni costitutive non lineari.

Il secondo, conosciuto anche come modello di chiusura del secondo momento, risolve l'equazioni di trasporto per ciascun componente del tensore di Reynolds [4];

- *Steady*, in quanto si affronta un problema tempo indipendente;
- *Three dimensional*, poiché si studia il moto nelle 3 direzioni e non sul piano di simmetria;
- *Turbulent*, che si attiva in automatico in funzione delle scelte precedenti (K-epsilon...);

CONDIZIONI AL CONTORNO Per quanto riguarda invece le condizioni al contorno, l'unico accorgimento è stato introdurre una velocità iniziale di $2 \frac{m}{s}$ lungo l'asse X in quanto aiuta l'inizializzazione del *Grid Sequencing*, analizzato successivamente. Altro accorgimento che non muta i risultati in questo caso non accoppiato termicamente è stato imporre la temperatura del flusso indisturbato a 30 °C essendo quella alla quale era soggetta la vettura durante i test termocoppiati da cui si sono poi ricavati i dati sperimentali per impostare il modello su TAITherm come si vedrà al momento opportuno.

2.4.3 Regions

Una volta importata la geometria nelle parti è necessario andare a creare le corrispettive *regions* e *boundary* che corrispondono rispettivamente alla superficie e bordo della parte. Svolta questa semplice operazione è possibile andare ad imporre le condizioni di prova quali la velocità di ingresso del flusso sull'*inlet* della galleria, le condizioni di *non-slip* sulle pareti della stessa ma soprattutto si vanno ad inserire nelle *region* delle masse radianti quei fattori introdotti precedentemente con ANSA sulle perdite di carico. Prendendo per esempio il radiatore, si assume che il Δp in funzione dello spessore tra ingresso ed uscita abbia un andamento del tipo:

$$\frac{\Delta p}{t} = K_1 V^2 + K_2 V$$

dove t è la distanza tra la superficie di ingresso ed uscita del radiatore, mentre K₁ e K₂ sono rispettivamente il coefficiente di porosità inerziale e viscoso. Tali parametri vengono ottenuti studiando il comportamento della pressione tra ingresso e uscita del radiatore in funzione della velocità (e quindi della portata d'aria). Rappresentando in un grafico la perdita di pressione lineare (cioè rapportata allo spessore) con la velocità e interpolando quadraticamente si ottengono tali coefficienti. Allo stesso modo viene svolto per il condensatore e l'intercooler. Su STAR viene richiesto ciascuno dei due coefficienti lungo le 3 direzioni principali, ma essendo tali masse radianti allineate lungo l'asse x si pone sui restanti assi un valore di 2-3 ordini maggiore in modo da diventare una porosità fittizia e quindi trascurabile.

2.4.4 Solver

Definita la fisica e le condizioni al contorno, si vanno a definire le caratteristiche del solutore: naturalmente vengono riprese le funzioni viste in precedenza all'interno della fisica del problema. Ciò che preme essere fatto notare riguarda principalmente:

• *Courant number,* il numero di Courant. Esso è definito come (nel caso monodimensionale):

$$C = \frac{u \cdot \Delta t}{\Delta x}$$

dove u rappresenta la velocità del flusso, Δt è l'intervallo temporale e Δx quello spaziale. Tale numero deve essere inferiore ad un certo parametro soglia che dipende dalla tipologia di equazione che deve essere risolta e dal tipo di schema numerico utilizzato per la soluzione. Nel caso implicito esso può essere maggiore in quanto sono meno sensibili all'instabilità numerica e per questo si passa da un $C_{max} = 1$ del caso esplicito al valore imposto di C = 250.

- La funzione AMG linear solver e il V-cycle. Durante le prime iterazioni può succedere che il numero di Courant sia troppo alto causando un rallentamento nella convergenza: ciò è causato dal solutore multigriglia che si trova a lavorare in condizioni troppo sfavorevoli in termini di risoluzione di griglia. I metodi algebrici multigriglia permettono di risolvere nelle fasi iniziali le matrici sparse laddove la multigriglia geometrica è troppo difficile da applicare. Tale procedimento viene effettuato tramite cicli a "V" in quanto rappresenta il tipo più semplice di ciclo fisso. Nella prima tappa, si esegue una serie di sweep di rilassamento al livello più raffinato e trasferisce i residui al livello successivo. Quindi, l'operazione viene ripetuta su livelli successivamente meno raffinati fino a raggiungere il livello più grossolano. Una "griglia" grossolana contiene generalmente solo poche "celle". Dopo aver terminato le sweep sul livello più grossolano, la soluzione viene utilizzata per correggere la soluzione al livello successivo più fine. Alcune sweep di rilassamento vengono eseguite su quel livello prima di ripetere il processo fino a raggiungere il livello più raffinato.
- *Expert driver*: nello specifico la funzionalità che viene attivata è la creazione di "rampe" numeriche. Ciò significa che nelle prime iterazioni si limita in modo crescente il valore di soglia di alcuni parametri, uno su tutti il CFL, in modo da limitare i residui e consentire al solutore multigriglia di lavorare in condizioni ottimali.

Con tali impostazioni, una volta ottenuta la simulazione risulta essere un buon *feedback* il grafico dell'andamento in funzione del numero di iterazioni del CFL e dell'AMG cycles: entrambi devono stabilizzarsi dopo alcune oscillazioni iniziali, ma il secondo nello specifico si deve attestare nell'intorno dei valori $2 \div 3$. Un altro importante *check* può essere l'analisi della velocità massima: se in funzione delle iterazioni si osserva che in un qualche punto del dominio si ha una velocità massima non ammissibile per il caso studiato (più di un ordine di grandezza maggiore rispetto alle velocità analizzate) è possibile che ci siano dei problemi nella simulazione.

STOPPING-CRITERIA Nella sezione omonima si è impostato come unico parametro di termine della simulazione il numero di iterazioni massime: questa quindi continuerà a calcolare la soluzione indipendentemente dall'essere giunti o meno a convergenza. Ciò significa che dovrà essere l'utente ad inserire un valore nè troppo basso (causa il non raggiungimento delle condizioni di convergenza) nè troppo alto (spreco di risorse computazionali e perdita di tempo), per ottenere i risultati voluti.

Il processo può essere quindi riassunto nel diagramma a blocchi proposto nel Grafico 2.1.



Grafico 2.1: Schematizzazione a blocchi del processo simulativo - Modello standard

3 | ANALISI DEI RISULTATI E CONVERGENZA

Nel corso di questo Capitolo verranno presentati i risultati ottenuti, ma per ragioni di segreto aziendale tutti i grafici saranno normalizzati rispetto ad un certo valore target. Vengono illustrati i primi casi iniziali con relative problematiche al variare della velocità e della mesh ed infine le riflessioni che hanno portato alla soluzione dei problemi riscontrati.

3.1 OBIETTIVI

Essendo questa parte la base di partenza per le successive analisi accoppiate, risulta fondamentale che tutte le mesh di volume abbiano prodotto dei risultati coerenti e convergenti. L'attenzione si concentra soprattutto su questo aspetto in quanto il modello fisico, considerando anche l'effetto termico, cambierà in maniera tutto sommato poco invasiva ed eventuali errori riscontrati si andrebbero ad eliminare calcolando il Δ di variazione tra i due casi. Ciò è vero anche per la mesh, in quanto si utilizza la medesima ma poiché come si vedrà nel seguito comporterà, all'aumentare della velocità, un errore vistoso sulla convergenza al diminuire della *base size*, si è cercato di porre rimedio, riuscendo nell'intento. L'analisi verrà eseguita al variare della velocità e in funzione della taglia di mesh andando a riempire una matrice del tipo illustrato in Tabella 3.1, sia per il C_x che per il C_z.

	5 mm	7.5 mm	10 mm	12 mm	12.5 mm	15 mm
130 km/h	X	Х	Х	X	Х	Х
170 km/h	X	Х	Х	Х	Х	Х
210 km/h	X	Х	Х	Х	Х	Х
250 km/h	X	Х	Х	Х	Х	Х

Tabella 3.1: Analisi – Funzione di mesh e velocità

In essa:

- La prima riga indica la variazione di *base size* applicata che influirà su tutta la mesh, essendo i boxes di infittimento funzione percentuale relativa a tale valore. Il caso standard è fissato a 10 mm;
- La prima colonna indica la variazione di velocità che si è deciso di analizzare: si parte dal limite autostradale e si giunge nell'intorno della velocità massima del mezzo (che si ricorda pari a 250 km/h);
- Il solo caso a 130 km/h è stato valutato con un taglia di mesh pari a 20 mm. I risultati ottenuti erano privi di riscontro e perciò si è deciso di non utilizzarla come valore di confronto.

La macro utilizzata è impostata per funzionare in maniera corretta ad una velocità massima di 140 km/h con una base size di 10 mm e una struttura dei prism layer pari a:

- Numero di prismi: 10;
- Altezza primo prism layer: 0.05 mm;
- Spessore totale: 8 mm

utilizzando tutte le impostazioni viste nel Capitolo 2. Così facendo sono stati ottenuti i primi risultati per la velocità più bassa.

3.2 PRIME SOLUZIONI

Come anticipato il primo calcolo ha portato dei risultati a prima vista particolari: in termini di coefficienti C_z , C_x e residui non sono emersi particolari problemi e anzi il caso è sicuramente andato a convergenza. Ciò che ha preoccupato analizzando i piani di velocità è stata la scia: per questo motivo si faccia riferimento alla Figura 3.1, dove le quote sono riferite rispetto al mozzo ruota.





(b) Z = -0.053 m







Figura 3.1: Piani di velocità – Normale asse Z (V = 130 km/h)

La 4C come tutte le vetture risulta simmetrica a livello di carrozzeria e quindi non vi è motivo per una tale asimmetria nella scia. Analizzando meglio il veicolo si è scoperto la presenza di una deviatore di flusso collocato nel solo lato sinistro del diffusore. Tale dispositivo è visibile nella Figura 3.2 nella sua modellazione su ANSA.



Figura 3.2: Deviatore di flusso nel diffusore (ANSA)

Questo dispositivo (dopo un rapido confronto interno) si è scoperto essere stato aggiunto successivamente per risolvere un problema critico di raffreddamento della testa del cambio. Infatti, con la presenza di questa superficie, gran parte del flusso del diffusore viene deviato all'interno del vano motore creando una grande bolla di ricircolo a valle di esso. Tale bolla, visibile chiaramente sfruttando la visualizzazione dell'integrale di convoluzione riportato in Figura 3.3, essendo solo nel lato sinistro causa un'importante differenza a livello di tutti i coefficienti calcolati.



Figura 3.3: Integrale di convoluzione – Bolla di ricircolo

Osservando la Figura 3.4 si vede chiaramente che con piani di sezione a coordinate \pm Y simmetriche si ottengono profili di velocità diversi ed è visibile nel lato del deviatore (Y negative, lato sinistro) la zona di ricircolo. A



Figura 3.4: Piani di velocità – Normale asse Y (V = 130 km/h)

scopo di pura conferma della bontà del modello lavorato su ANSA, si è deciso rimuovere il deviatore: così facendo qualora la scia non fosse diventata simmetrica, avrebbe significato la presenza di un qualche errore nel modello iniziale. In Figura 3.5 si riportano gli stessi piani di sezione mostrati in Figura 3.1: come si può notare, rimuovendo il deviatore la situazione ritorna alla normalità. Naturalmente, volendo simulare il veicolo al vero (anche per eventuali confronti sperimentali futuri) è stato utilizzato il modello **con** il deviatore di flusso per le successive analisi.





(b) Z = -0.053 m



(c) $Z = 0.097 \, m$

(d) $Z = 0.247 \, m$

Figura 3.5: Piani di velocità (senza deviatore) – Normale asse Z (V = 130 km/h)



Figura 3.6: Piani di velocità (senza deviatore) – Normale asse Y (V = 130 km/h)

3.2.1 Problema di convergenza al variare della misura di mesh

Avendo chiarito il discorso riguardo l'asimmetria della scia, tutti i casi analizzati non hanno dato problemi in termini di residui, *CFL*, V_{max} o *AMG*, ma facendo variare (infittendo) la taglia di mesh, ciò che si osserva è che all'aumentare della velocità, sia il C_x che il C_z non si stabilizzano nell'intorno di un valore. Infatti, a livello teorico, portando la misura di cella a livello puntuale i risultati calcolati dovrebbero rappresentare la realtà (considerando un modello fisico applicato coerente): naturalmente ciò non è possibile in quanto vorrebbe dire numeri di celle troppo elevati. Quindi l'analisi di mesh si prepone due obiettivi:

- 1. Comprendere quale sia il valore asintotico, nell'intorno del quale la simulazione dovrebbe attestarsi;
- 2. Comprendere quale misura di *base size*, sia la migliore in termini di ore di calcolo e risultati ottenuti: cioè si accetta un certo errore nel risultato (piccolo e quantificato) qualora questo sia bilanciato da un netto vantaggio in termini di ore computazionali risparmiate.

Prima di passare all'analisi dei risultati (normalizzati per ragioni di segreto aziendale), nei Grafici 3.1 e 3.2 vengono riportati i gli andamenti relativi ai residui¹, alla velocità massima registrata, al CFL e al AMG-Cycle, a scopo dimostrativo (tutti i casi hanno avuto un andamento del tutto simile a quello riportato in questi diagrammi). Naturalmente per quanto riguarda la velocità massima, varia il valore massimo in modulo ma non l'andamento del grafico. Come anticipato nella descrizione della fisica nella Sezione 2.4.4 il CFL si stabilizza al valore di 250, così come l'andamento predetto per l'AMG e i residui sono sufficientemente piccoli e stabili, soprattutto il Tdr ed il Tkr (rispettivamente il tasso di dissipazione e l'energia cinetica turbolente) che hanno piccole variazioni nell'intorno di un valore qualitativamente piccolo. Lo stesso discorso è valido per l'andamento in funzione delle iterazioni di C_x e C_z , i quali dopo alcune oscillazioni iniziali si stabilizzano nell'intorno di un valore. Per la determinazione di tali coefficienti si è considerata la media delle ultime 500 iterazioni su ogni parametro analizzato. Nel Grafico 3.3 si riporta a scopo dimostrativo l'andamento dei grafici C_x e C_z in funzione del numero di iterazioni normalizzato rispetto al valore medio calcolato sulle ultime 500. Come si può notare, il C_x tende a stabilizzarsi già dopo poche migliaia di iterazioni, mentre il C_z tende ad oscillare per più tempo: da qui la necessità di un numero così consistente di iterazioni. I risultati (in termini di stabilità dello stesso) mostrati nel Grafico 3.3 sono d'esempio in quanto rappresentative di tutte le simulazioni calcolate.

¹ Il grafico dei residui è plottato in un sistema semi-logaritmico per l'asse delle ordinate.



Grafico 3.1: Residui – Velocità 130 km/h, Base size 10 mm



Grafico 3.2: Velocità 130 km/h, Base size 10 mm



Grafico 3.3: C_x e C_z normalizzati in funzione del numero di iterazioni (V = 130 km/h BS = 10 mm)

Appurata la stabilità della soluzione, i risultati ottenuti dall'analisi di variazione della taglia di mesh sono riportati nella Tabella 3.2.

	5 mm	7.5 mm	10 mm	12 mm	12.5 mm	15 mm
130 km/h	101.7	101.3	101.9	102.5	102.5	103.7
170 km/h	99.9	101.1	101.8	102.4	102.3	103.5
210 km/h	99.1	100.7	101.7	102.3	102.3	103.7
250 km/h	99.3	100.8	101.6	102.2	102.3	103.6

Tabella 3.2: C_{χ} normalizzato [%]

Gli stessi possono essere rappresentati facendo variare la *base size* a velocità fissata e ottenendo gli andamenti riportati nei Grafici 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7.



Grafico 3.4: C_x normalizzato al variare della mesh – V = 130 km/h



Grafico 3.5: C $_{\chi}$ normalizzato al variare della mesh – V = 170 km/h



Grafico 3.6: C_{χ} normalizzato al variare della mesh – V = 210 km/h



Grafico 3.7: C_{χ} normalizzato al variare della mesh – V = 250 km/h

Discorso analogo per il C_z , riportato nella Tabella 3.3.

	5 mm	7.5 mm	10 mm	12 mm	12.5 mm	15 mm
130 km/h	102.0	81.6	114.4	103.2	116.0	160.8
170 km/h	50.8	91.6	118.8	116.4	121.6	168.0
210 km/h	58.8	100.4	117.6	119.6	136.0	178.4
250 km/h	73.6	112.0	139.2	200.0	220.0	240.0

Tabella 3.3: C_z normalizzato [%]

Anche in questo caso, i risultati possono essere rappresentati come prima ottenendo gli andamenti riportati nei Grafici 3.8, 3.9, 3.10 e 3.11.







Grafico 3.9: C_z normalizzato al variare della mesh – V = 170 km/h



Grafico 3.10: C_z normalizzato al variare della mesh – V = 210 km/h



Grafico 3.11: C_z normalizzato al variare della mesh – V = 250 km/h

Come si può notare, nonostante l'infittimento della mesh, all'aumentare della velocità il valore non si stabilizza nell'intorno del valore "asintotico": ciò è visibile in maniera modesta sul C_x , mentre diventa decisamente più tangibile sul C_z . Questo comportamento si osserva (in maniera ridotta) anche sul caso a 130 km/h: di conseguenza risulta essere anomalo e va corretto. Analizzando i dati ottenuti, le mesh generate e rivedendo le ipotesi della fisica del modello, si è giunti ad identificare le seguenti problematiche:

• Facendo riferimento al modello "Two layer All Y⁺ wall treatment", si evince che la carrozzeria (intesa come l'insieme delle superficie esterne) debba avere una Y⁺ a parete nell'intorno dell'unità affinché il modello tratti coerentemente lo strato limite.

Per prima cosa va definita la coordinata adimensionale Y⁺:

$$Y^{+} = \frac{yu^{\star}}{v} \qquad u^{+} = \frac{u}{u^{\star}} \qquad T^{+} = (T - T_{w})\frac{\rho C_{p}u^{\star}}{\dot{q}''}$$

dove:

- y è la distanza sulla normale dalla superficie nel centroide della cella;
- u è la componente di velocità parallela alla superficie della cella;
- T è la temperatura della superficie della cella;
- T_w è la temperatura al contorno della superficie;
- q^{''} è il flusso di calore;
- ν è la viscosità cinematica;
- ρ è la densità;
- C_p è il calore specifico;
- u^{*} è la velocità di riferimento, calcolata come:

$$\mathfrak{u}^{\star} = \sqrt{\frac{ au_{w}}{
ho}}$$

con τ_w lo sforzo d'attrito a parete.

Avendo definito la coordinata adimensionale Y^+ è possibile suddividere lo strato limite turbolento in funzione di essa: – Per $Y^+ = 0$ fino a $Y^* \simeq 10$ si è nel *sottostrato viscoso*, dove per l'appunto dominano gli effetti degli sforzi viscosi e:

$$u^+ = Y^+$$
 $T^+ = \sigma u^+$ $q^+ = \frac{\rho u^* u^2}{2\dot{q}''}$

con σ numero di Prandtl molecolare;

Per Y⁺ ≃ 30 fino a circa il 20% dello strato limite, si è nella *regione logaritmica*, dove la velocità segue un profilo del tipo:

$$u^+ = \frac{1}{K}\ln(Y^+) + A^+$$

con K e A⁺ costanti sperimentali.

 Per Y⁺ maggiori del 20% dello strato limite si è nella regione esterna, dove il profilo di velocità dipende dal flusso.

Oltre alla suddivisione appena citata, esiste un'ulteriore strato compreso tra il sottostrato viscoso e la regione logaritmica, chiamato *buffer layer*: qui si ha il massimo effetto di gradiente di velocità e fluttuazioni turbolente. Essendo massimi gli sforzi si ha la maggior dissipazione di energia; inoltre essendo una regione dove gli effetti viscosi ed inerziali lavorano congiuntamente risulta molto complessa la trattazione. Proprio per questo motivo il modello *Two-Layer All* Y⁺ *Wall Treatment* impone che a parete ci si trovi o nel sottostrato viscoso o nella regione logaritmica, perché altrimenti qualsiasi modello adottato effettua delle valutazioni medie che risultano essere poco affidabili [3].

Analizzando le immagini di Y⁺ a diverse velocità si osserva che effettivamente il solo caso a 130 km/h risulta coerente con tale ipotesi. Per risolvere si è intervenuto andando a ridurre l'altezza del primo *prism layer*: il valore applicato e riportati nella Tabella 3.4 sono stati ottenuti valutando le varie figure e notando che a parità di superficie non si otteneva lo stesso Y⁺. Quindi, stabilendo una proporzione tra velocità, altezza del primo prisma e Y⁺ rispetto al caso a 130 km/h, si è risolto questo primo problema.

Velocità [km/h]	h first layer [mm]
130	0.05
170	0.025
210	0.015
250	0.005

Tabella 3.4: Altezza primo prism layer in funzione della velocità

Nelle Figure 3.7, 3.7 e 3.7 si riportano le immagini relative all' Y^+ a parete prima e dopo la modifica: risulta evidente come le impostazioni scelte permettano di far ricadere i casi a velocità maggiore all'interno del range desiderato.



(a) PL default

(b) PL modificati





Figura 3.8: Confronto Y^+ a parete – V = 210 km/h



Figura 3.9: Confronto Y^+ a parete – V = 250 km/h

 Modificando l'altezza del primo strato, ma mantenendo costante numero di prismi e altezza totale si ottiene un fattore di crescita geometrico troppo grande e soprattutto ad alta velocità dove i gradienti di velocità (δV/δn) rispetto alla normale della superficie diventano troppo intensi. Per ovviare a questo problema allora si è deciso di modificare anche questi due parametri cercando di mantenere circa costante l'altezza ed il fattore di crescita geometrico. Dopo alcuni tentativi si è ottenuto un best fit scegliendo i parametri riportati nella Tabella 3.5. Analizzando

	10 mm	7.5 mm	5 mm
130 km/h	h = 8 mm # Layer: 10	h = 7.5 mm # Layer: 12	h = 7 mm # Layer: 15
170 km/h	h = 8 mm # Layer: 12	h = 7.5 mm # Layer: 14	h = 7 mm # Layer: 18
210 km/h	h = 8 mm # Layer: 12	h = 7.5 mm # Layer: 15	h = 7 mm # Layer: 18
250 km/h	h = 8 mm # Layer: 15	h = 7.5 mm # Layer: 18	h = 7 mm # Layer: 21

Tabella 3.5: Altezza totale e numero di prism layer in funzione della velocità e mesh

la mesh più fitta con il numero di prism layer e altezza totale costante al valore di default (h = 8 mm # Layer: 10), nelle zone di maggior raffinamento avveniva uno spiacevole effetto: ad esempio in vicinanza degli specchietti il box di infittimento porta il valore di cella ad essere il 50% della base size. Ciò significa che con una BS di 5 millimetri, si ottengono celle di dimensione pari alla metà. Lasciando 10 prismi e 8 mm di altezza totale, avviene che l'altezza dell'ultimo prisma diventa paragonabile se non superiore al lato della prima cella di volume. Questa situazione causa un problema di interfaccia che viene risolto imponendo che l'altezza dell'ultimo prisma non sia mai superiore alla più piccola cella di volume vicina. Tale risultato si può ottenere modificando, come detto, il numero di prism layer (che influenza il fattore di crescita permettendo di mantenere sufficientemente piccolo l'altezza dell'ultimo prisma) e facendo diminuire leggermente l'altezza complessiva. Questo viene fatto perché nel caso a 250 km/h, partendo da un valore estremamente basso di altezza per il primo prisma, per raggiungere l'altezza totale imposta con un fattore di crescita sufficientemente piccolo (per limitare l'altezza dell'ultimo prisma) è necessario aumentare notevolmente il numero di prismi. Non vi sono particolari limitazioni sul numero di prism layer, ma va fatto notare che essendo questi presenti su tutta la superficie esterna del veicolo², comportano un aumento in ore di calcolo.

Modificando questi aspetti, rigenerando la mesh di volume e procedendo nuovamente con il calcolo è possibile ottenere i nuovi risultati.

² Sono presenti anche in tutte le zone sotto la carrozzeria come il vano motore, ma sono limitati ad 1.

3.3 RISULTATI CORRETTI

Come detto in precedenza, è possibile ora ripresentare le tabelle ed i grafici di C_x e C_z convergenti. Ciò che si ottiene facendo variare la taglia di mesh può essere rappresentato nella Tabella 3.6, tenendo conto che per le dimensioni di *base size* maggiori di 1 cm sono stati mantenuti validi i valori di altezza totale, altezza del primo strato e numero di prismi, ottenuti per il caso a 1 cm per le diverse velocità.

	5 mm	7.5 mm	10 mm	12 mm	12.5 mm	15 mm
130 km/h	100.5	100.8	101.5	102.1	102.1	103.2
170 km/h	100.3	100.4	101.3	101.8	101.8	103.1
210 km/h	100.2	100.4	101.1	101.8	101.9	103.2
250 km/h	100.0	100.3	101.3	102.3	102.4	103.2

Tabella 3.6: C_x normalizzato [%] – Prism layer modificati

Gli stessi possono essere rappresentati facendo variare la *base size* a velocità fissata e ottenendo gli andamenti riportati nei Grafici 3.12, 3.13, 3.14 e 3.15.



Grafico 3.12: C_x normalizzato al variare della mesh – V = 130 km/h (PL modificati)



Grafico 3.13: C_x normalizzato al variare della mesh – V = 170 km/h (PL modificati)



Grafico 3.14: C_x normalizzato al variare della mesh – V = 210 km/h (PL modificati)



Grafico 3.15: C_x normalizzato al variare della mesh – V = 250 km/h (PL modificati)

				•		
	5 mm	7.5 mm	10 mm	12 mm	12.5 mm	15 mm
130 km/h	100.4	98.7	127.7	115.2	129.5	179.5
170 km/h	99.6	101.7	135.6	135.2	151.9	180.3
210 km/h	99.4	107.6	124.9	123.7	133.1	174.6
250 km/h	99.3	106.9	142.8	159.1	181.2	217.4

Discorso analogo per il C_z , riportato nella Tabella 3.7.

Tabella 3.7: C_z normalizzato [%] – Prism layer modificati

Anche in questo caso, i risultati possono essere rappresentati come prima ottenendo gli andamenti riportati nei Grafici 3.16, 3.17, 3.18 e 3.19.



Grafico 3.16: C_z normalizzato al variare della mesh – V = 130 km/h (PL modificati)



Grafico 3.17: C_z normalizzato al variare della mesh – V = 170 km/h (PL modificati)



Grafico 3.18: C_z normalizzato al variare della mesh – V = 210 km/h (PL modificati)



Grafico 3.19: C_z normalizzato al variare della mesh – V = 250 km/h (PL modificati)

Come è possibile osservare dai grafici non vi sono particolari problemi in termini di C_x e la scelta della taglia di mesh influisce in maniera non troppo significativa sul risultato finale, in quanto si ha una variazione minima nelle $2 \div 3$ taglie di mesh più fitta. Discorso diverso per il C_z , il quale risulta essere più variabile a causa del fatto che, dal momento che si utilizza un modello RANS, questo media la vorticità più piccola della dimensione di griglia e naturalmente, variando questa, si riescono a cogliere maggiori (o minori) variazioni che intervengono direttamente nel computo totale del coefficiente.

3.4 ANALISI TEMPORALE

Senza lasciarsi traviare dal titolo della Sezione, in quanto si ricorda che lo studio è tempo indipendente essendo questa un'analisi di tipo stazionaria, si vogliono analizzare le tempistiche affrontate in termini di ore di calcolo, per ottenere i risultati fino a qui presentati. Si tenga a mente che tutti i casi precedenti sono stati eseguiti con 336 processori e sono state effettuate per il solo modello standard un totale di 542 ore per i casi con prism layer non modificati. Il numero di iterazioni è risultato essere variabile in funzione anch'esso della base size: nella Tabella 3.8 si riportano le iterazioni impostate in funzione della mesh.

Base size	Numero iterazioni
5 mm	7500
7.5 mm	6500
10 mm	5000
12 mm	5000
12.5 mm	5000
15 mm	5000

Tabella 3.8: Numero di iterazioni in funzione della misura della base size

Quello che si ottiene è un andamento simile, come si poteva supporre, al variare della velocità nonostante la modifica dei prism layer: per semplicità di lettura si riporta l'andamento per una fissata velocità dato che le altre non si discostano molto da quanto segue. Nella Tabella 3.9 si riporta il caso a 210 km/h. Questi valori risultano meglio apprezzabili nel Grafico 3.20. Co-

Base size	Ore di calcolo	Gigabyte file .sim
5 mm	105.4	142.7
7.5 mm	42.0	50.6
10 mm	16.4	25.3
12 mm	11.7	18.1
12.5 mm	11.5	16.6
15 mm	8.0	12.4

Tabella 3.9: Ore di calcolo e dimensioni del file .sim in funzione della mesh

me si può vedere, i valori crescono in maniera direttamente proporzionale all'infittimento della mesh: uno stesso caso può passare da circa 17 ore con una mesh a 1 centimetro, arrivando persino a oltre 100 ore dimezzando la *base size*. Discorso analogo per le dimensioni della simulazione. I tempi qui riportati fanno riferimento alla generazione della mesh di volume (circa



Grafico 3.20: Ore di calcolo e dimensioni del file .sim in funzione della mesh

 $2 \div 3$ ore) sommato al tempo di calcolo effettivo, più il tempo per effettuare il *post-process* automatico ($\simeq 1$ ora). Quindi risulta semplici intuire che anche depurando i tempi al solo calcolo non si hanno variazioni sensibili. L'aumento è dovuto al fatto che il numero di celle aumenta consistentemente: si consideri la Figura 3.10. Considerando un cubo di lato 10 mm, questo



Figura 3.10: Cella di volume con diversa base size

contiene al suo interno 8 cubi più piccoli di lato 5 mm. Ciò significa che a li-

vello puramente qualitativo, il numero di celle è direttamente proporzionale alla *base size* di mesh: dimezzando questa si ottiene un fattore moltiplicativo di circa $2^3 = 8$ volte. Nella realtà, per fortuna, questo fattore non è così sfavorevole:

$$N_{BS_1 cm} = 116.3 \cdot 10^6$$
 celle $N_{BS_{0.5} cm} = 717.4 \cdot 10^6$ celle

Come si può osservare dal rapporto si ottiene:

$$\frac{N_{BS_{0.5} \text{ cm}}}{N_{BS_{1} \text{ cm}}} = \frac{717.4}{116.3} = 6.2 < 8$$

considerando i casi con stesse impostazioni sui prism layers. Infine l'ultima osservazione che si vuole effettuare è sull'influenza delle modifiche effettuate ai prism layer nel caso peggiore (V = 250 km/h e BS = 5 mm) rispetto al caso con i prismi lasciati a default:

$$N_{PL \mod} = 750.6 \cdot 10^6$$
 celle $N_{PL \mod} = 717.9 \cdot 10^6$ celle

che porta ad una differenza (dovuta ai soli prism layer modificati) maggiore di 30 milioni di celle.

4 CASO TERMICO: MODELLO E RICHIAMI TEORICI

Nel corso di questo Capitolo, viene presentato il processo che ha portato a costruire il modello accoppiato tra i due programmi STAR-CCM+ e TAITherm. Nel corso della spiegazione vengono richiamate le leggi fondamentali ed eventuali schematizzazioni numeriche operate dai software utilizzati.

4.1 SCOPO

Lo scopo di arrivare ad un modello accoppiato (aerodinamico e termico) si basa sull'unione dei punti di forza dei due programmi citati nella Sezione 2.1.1: i software STAR-CCM+ e TAITherm. Il primo, essendo un programma basato sul calcolo a volumi finiti, risulta corretto e coerente per gli studi termici convettivi ma poco affidabile nel calcolo della conduzione e dell'irraggiamento. Per questo motivo si crea un modello accoppiato con TAITherm, il quale sfruttando la potenzialità degli elementi finiti, calcola in modo del tutto più preciso la conduzione e l'irraggiamento, come si vedrà in seguito. Questo in parole povere, importa da STAR il coefficiente di scambio convettivo h, calcola un profilo di temperatura completo del veicolo (considerando come detto tutte e 3 le forme di trasferimento di calore) e lo riesporta in termini di temperature di superfici a STAR. Questo processo, effettuato un certo numero di volte, porta ad un'analisi completa sia del comparto aerodinamico che di quello termico.

4.2 ANALISI PRELIMINARE - ANSA

Sebbene il processo preveda l'utilizzo delle stesse mesh di volume utilizzate per i casi trascurando la componente termica, è necessario riprendere il modello ANSA [2] della vettura completa per crearne uno differente da utilizzare su TAITherm. Nello specifico sono state attuate le seguenti operazioni:

- Il modello completo viene spogliato della carrozzeria e vengono mantenuti i soli componenti "interni". Per comprendere meglio il significato risulta più semplice osservare la Figura 4.1, dove si può notare la presenza di un tratto del pavimento della galleria;
- Una volta ottenuto il modello come mostrato in precedenza, si procede a rigenerare la mesh con elementi di tipo "QUAD", avendo TAITherm un approccio agli elementi finiti: si potrebbe utilizzare la medesima mesh con elementi triangolari, ma l'esperienza maturata dal reparto ha notato una maggiore accuratezza nel calcolo (soprattutto per l'ir-



Figura 4.1: Modello semplificato della vettura – ANSA

raggiamento) utilizzando elementi di tipo tipo "QUAD", nonostante il software gestisca entrambe le tipologie.

- Ottenuta la nuova mesh, si è proceduto con i medesimi passaggi per migliorare la qualità delle celle visti nella Sezione 2.2 ponendo attenzione oltre alla *skewness* anche su:
 - Aspect ratio: il quale verifica che il rapporto delle dimensioni della cella supposta rettangolare (a × b) non sia superiore ad un certo valore di soglia;
 - *Warping*: il quale controlla l'angolo tra le normali di due celle contigue, che non deve essere inferiore ad un certo valore impostato.
 - Minimum length: tale parametro serve unicamente a controllare che durante la fase di rigenerazione della mesh, essa non sia diventata troppo fitta. Infatti, controlla che ogni cella abbia una dimensione (su ciascun lato) maggiore del valore impostato (1 mm): generalmente un numero accettabile di celle per il software nel calcolo della termica di un veicolo completo si attesta intorno ai 3 milioni di celle.

Compiuti questi passaggi, il modello viene esportato da ANSA su TAITherm per proseguire nella creazione del modello completo.

4.3 TAITHERM

Il software *TAITherm* permette di calcolare utilizzando una discretizzazione agli elementi finiti le principali forme di trasferimento di energia termica [9].



Figura 4.2: Modello della vettura importato su TAITherm

4.3.1 Conduzione

A livello fisico, la conduzione è il flusso di energia interna da una zona a temperatura più alta verso una più bassa a causa delle interazioni tra particelle (molecole e atomi) adiacenti. Questo fenomeno ha luogo in tutte le forme della materia: solidi, liquidi, gas e persino plasma. Tuttavia, la conduzione è maggiore nei solidi a causa della stretta relazione spaziale tra gli atomi, cosa che negli altri stati della materia si riduce proprio all'aumentare di tale distanza. La legge che descrive tale comportamento prende il nome di *legge di Fourier*, che in forma differenziale viene normalmente riportata nel seguente modo:

$$\dot{q} = -k\nabla T$$

dove q è il flusso di calore, k è il tensore di conducibilità termica e ∇T rappresenta il gradiente di temperature. Il tensore di conducibilità di un materiale può essere fortemente funzione della temperatura, della pressione (nel caso dei gas) e della natura dello spazio. Se lo spazio soggetto a tale campo di temperature è isotropo, cioè se le proprietà del volume di controllo non cambiano al variare della direzione e sono omogenee su di esso, il tensore si riduce alla sola costante k. Nel caso contrario, il campo si dice anisotropo e la conducibilità assume il valore di tensore. Il segno negativo dell'espressione precedente è presente a causa del fatto che il tensore di conducibilità è sempre positivo ma il calore, in accordo con il secondo principio

della termodinamica, deve fluire dalla zona a temperatura maggiore verso quella a temperatura minore.

4.3.2 Convezione

In termini fisici, la convezione è il trasferimento di energia grazie al movimento di un fluido. In campo ingegneristico si è soliti utilizzarlo per ottenere specifici cambiamenti termici, come nel caso di radiatori o dissipatori. La convezione comprende due meccanismi di trasporto:

- Il trasferimento di energia dovuto al moto randomico molecolare (detto diffusione).
- Il trasferimento di energia dovuto al moto medio della massa fluida (detto avvezione).

Si voglia prendere per esempio il trasferimento termico da un solido alla corrente che lo lambisce: i primi strati sono soggetti alla diffusione molecolare, in quanto si ha velocità nulla a parete per la condizione di aderenza. Normalmente la convezione viene suddivisa in naturale (o libera) e forzata, tuttavia calcolando il fattore:

si ottiene che, se molto maggiore di 1 predomina la convezione naturale, e viceversa il contrario. Nel caso sia circa unitario, significa che le due tipologie coesistono e devono essere entrambe tenute in considerazione.

4.3.3 Irraggiamento

Dal punto di vista fisico, l'irraggiamento è l'emissione di onde elettromagnetiche che ogni corpo, con temperatura superiore allo zero assoluto, emette e rappresenta la conversione di energia termica in energia elettromagnetica. Questa è generata dal movimento termico delle particelle cariche nella materia, in cui si osserva un'accelerazione delle cariche ed un'oscillazione dei dipoli. In questo modo, la generazione elettrodinamica dei campi elettrici e magnetici accoppiati, causa l'emissione delle radiazioni termiche. Queste, come la luce, non richiedono la presenza di materia per propagare e viaggiano più veloce nel vuoto. La loro propagazione può essere descritta in vari livelli di complessità a seconda del campo di studio che si vuole analizzare e nel caso più semplice si può riprendere la relazione di *Stefan-Boltzmann* sul corpo nero, corretta del coefficiente di emissività ε (compreso tra 0 e 1 con 1 completamente riflettente):

$$\dot{\mathbf{q}} = \varepsilon \sigma T_s^4$$

dove σ è la costante di *Stefan-Boltzmann* e vale:

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \, \frac{W}{m^2 \, K^4}$$

Se la radiazione è incidente su una superficie, una parte viene assorbita, una parte viene riflessa ed una parte è trasmessa attraverso il materiale:

$$\dot{q}_{inc} = \alpha \dot{q}_{inc} + \rho \dot{q}_{inc} + \tau \dot{q}_{inc} = \dot{q}_{abs} + \dot{q}_{ref} + \dot{q}_{tras}$$
dove α , ρ e τ sono i coefficienti assorbimento superficiale, riflessione e trasmissione, tutti compresi tra 0 e 1. Questi dipendono direttamente dalla temperatura della superficie, dal trattamento superficiale (lucidato, liscio, rugoso...), dall'angolo di incidenza e dalla lunghezza dell'onda incidente.

4.3.4 Modello

Il modello prevede l'importazione della geometria precedentemente creata su ANSA, la quale, come visto nel modello aerodinamico, prevede la suddivisione di ciascun componente con un apposita PiD, che viene mantenuta nell'importazione. Tale suddivisione dei componenti permette di andare ad imporre diverse caratteristiche, come:

- Materiale (in termini di densità, conduttività e calore specifico) e spessore, che influisce sulla conduzione. Inoltre, nei casi di componenti (per esempio i ripari calore), il programma permette di identificare una stratificazione dei materiali (*multilayer*) andando a specificare spessore e materiale di ciascuno.
- Trattamento superficiale, che influisce sull'irraggiamento, in termini di riflettività;
- Temperatura iniziale, imposta ad un determinato valore se considerato una sorgente oppure lasciato a 30 °C come parametro iniziale;
- Coefficiente di scambio convettivo e temperatura del fluido, se la superficie è soggetta a convezione (forzata a causa della velocità del flusso). Tale parametro viene imposto ad un valore fittizio costante poiché successivamente sarà importato da STAR.

Inoltre si è andati a creare due nodi fluidi, rispettivamente per:

- Batteria, simulando il quantitativo d'acqua contenuto all'interno (pari a 3 L);
- Serbatoio carburante, simulando il quantitativo di benzina all'interno (pari a 40 L sui 58 di capienza totale);

In questo modo si è andati a creare delle masse inerziali dal punto di vista termico e presenti (naturalmente) nelle condizioni reali. Si è resa necessaria la creazione di 4 modelli TAITherm, uno per ciascuna velocità, andando a modificare le temperature delle sorgenti, che nello specifico sono (per macro gruppi):

- Masse radianti;
- Linea di scarico;
- Compressore e turbina;
- Motore.

I valori di temperatura o potenza termica inseriti nei vari modelli sono stati ricavati da valori sperimentali per la velocità 130 km/h e per quella massima, recuperando i dati per i casi intermedi con un'approssimazione lineare.

4.3.5 Impostazioni del solutore

Essendo l'analisi tempo indipendente, si impone come parametro di convergenza che la soluzione al passo i sia rispetto a quella calcolata al passo i - 1al di sotto di una certa tolleranza per un certo numero di iterazioni. Nel modello in esame si è impostato un valore di tolleranza pari a 0.005 °C su 500 iterazioni. Dal punto di vista della risoluzione, si è adottato uno schema multi-griglia con impostazioni:

- Residui, con valore soglia $1 \cdot 10^{-8}$;
- Fattore di rilassamento del solutore multi-griglia, con valore pari a 0.70;
- Frequenza di aggiornamento della matrice di precondizionamento impostato su *high*.

Infine è stata impostata la tipologia di discretizzazione di studio dell'irraggiamento. Il modello scelto si basa sul far dipartire dal centroide di ogni singola cella un fascio di raggi inclinati in modo equispaziato rispetto alla normale. Il valore è variabile tra 1 e 5 dove 5 corrisponde al metodo più accurato con 4608 raggi. A livello qualitativo, il programma calcola l'intersezione eventuale di ciascuno con le altre celle del modello e computa l'irraggiamento corrispondente, attraverso un metodo detto *KD-tree*. Questo modello suddivide lo spazio di ricerca in un set di *boxes* di diversa dimensione, proporzionali e localizzati per catturare la disposizione spaziale della mesh. Ogni elemento fa riferimento ad uno (o più) set di boxes e tale informazione è utile per ridurre il computo delle intersezioni dei raggi.

4.4 STAR-CCM+

Su STAR, utilizzando le stesse mesh di volume generate per il caso standard, non si sono resi necessari cambiamenti. Di fatto è stato sufficiente copiare le simulazioni già utilizzate in precedenza e procedere con un'inizializzazione della soluzione. Una volta ottenuto il nuovo file *.sim* con la sola mesh, si è proceduto modificando alcuni parametri che riguardano nello specifico il modello fisico. In particolare sono stati modificati:

- L'opzione sulla densità costante del flusso in quanto a causa dell'apporto termico è necessario valutare tale differenza. Al contrario viene consigliata (e qui attivata) l'opzione *ideal gas*: ciò significa che l'aria nella sua evoluzione viene assunta come gas ideale.
- L'opzione *coupled energy*, che è stata attivata perché tale modello è un'estensione del *coupled flow* in quanto si aggiunge l'equazione dell'energia nella risoluzione simultanea. Come riportato nella guida del software, questa formulazione è sufficientemente robusta per la risoluzione di flussi compressibili o di flussi con termini di sorgente termica dominanti. A causa della forma precondizionata delle equazioni di governo che i modelli *coupled* applicano, il rateo di convergenza è effettivamente indipendente dal numero di Mach, dall'incompressibile fino

ai regimi supersonici. Il modello *coupled energy* permette inoltre di relazionarsi all'energia in termini di entalpia o di temperatura: dovendosi relazionare con TAITherm si è optato per lasciare il tutto in termini di temperatura.

• L'opzione *Gravity*, che è stata attivata per tenere conto dell'effetto della gravità sul fluido. Viene impostato coerentemente il valore secondo la classica terna cartesiana destrorsa x - y - z pari a [0, 0, -9.81] m/s².

A livello di *solver* sono state lasciate le medesime impostazioni viste per il caso standard modificando unicamente i valori di sotto-rilassamento delle rampe di salita del modello di turbolenza *K-epsilon*. Nello specifico:

- Nel *K-epsilon* si è portato il fattore a di *under-relax* a 0.65 con un valore di iterazione di fine rampa pari a 100;
- Nel *K-epsilon turbulent viscosity* si è modificato unicamente il fattore di *under-relax* a 0.75

Il resto dei parametri è stato lasciato pari al caso standard in modo da limitare il più possibile le differenze a livello numerico e ottenere in questo modo il Δ di variazione il più coerente e *fisica/solver* indipendente possibile.

4.4.1 Regions

Le *regions* sono state modificate unicamente per quanto riguarda quelle relative alle masse radianti. Infatti nel caso del radiatore e dell'intercooler (il condensatore è stato considerato spento in quanto non si è tenuto conto dell'impianto clima) si è intervenuti attivando l'opzione di sorgente di energia e imponendo che la temperatura di uscita fosse *inferred*, ossia calcolata. Questo perché, nel sotto albero dei *physics values*, si impongono i kW rilasciati al flusso tra la superficie di *inlet* ed *outlet* ed in maniera automatica, conoscendo la portata d'aria che investe la massa radiante, il software ricava la temperatura in uscita sapendo quella del flusso all'ingresso:

$$\mathbf{P} = \mathbf{m}\mathbf{C}_{\mathbf{p}}\Delta\mathbf{T} = \mathbf{m}\mathbf{C}_{\mathbf{p}}\left(\mathbf{T}_{\mathrm{out}} - \mathbf{T}_{\mathrm{in}}\right)$$

L'ultimo parametro che viene impostato è la temperatura della massa radiante che viene supposta lavorare sempre in condizioni ottimali come il radiatore (80 °C, ndr) oppure ricavata da prove sperimentali sul componente, come nel caso dell'intercooler. Una volta impostato in questo modo il modello su STAR non rimane che procedere con la fase di accoppiamento.

4.5 MACRO TERMICA E PROCEDURA DI ACCOPPIAMENTO

Anche nel caso termico, si possono sfruttare in gran parte la potenzialità del linguaggio *Java* per automatizzare gran parte del lavoro. Il processo di accoppiamento dei due si può articolare in diverse fasi:

• CFD-BEM.txt

Come suggerisce il nome, è necessario creare un file di testo che funga da collegamento tra i due software. Nello specifico tale file contiene il nome di tutti i componenti e associa le diverse facce tra i programmi. Per semplificare si supponga di avere un componente su STAR la cui faccia rivolta verso l'alto sia chiamata "A" e la corrispettiva verso il basso "B". Nel CFD-BEM.txt si collega il medesimo componente modellato con elementi "QUAD" su TAITherm avente le stesse facce chiamate per esempio "AA" e "BB". Una riga di testo allora potrebbe essere:

Equivalence Nome componente enabled mapped,mapped nome_parte_star@A AA@Front

In buona sostanza, l'importazione su STAR del modello (esportato come file .ntl da TAIThem) serve per confrontare i componenti del primo con quelli del secondo. La dicitura "mapped" significa che il confronto verrà eseguito cella per cella. Nel caso le geometrie fossero molto diverse tra un modello e l'altro è possibile utilizzare l'opzione "averaged" la quale attraverso una media elimina eventuali problemi di difformità nella sovrapposizione. Il confronto viene effettuato su tutto il modello ed è importante che in quello TAITherm non vi siano componenti in più rispetto a quello su STAR, pena l'arresto del processo, mentre il viceversa è ammesso.

Initialize coupling

Una volta ottenuto il file .txt sopra citato è necessario procedere con il vero accoppiamento. Quello che viene eseguito si può riassumere brevemente: tutti i componenti con relative facce (*front and back*) risultano avere, secondo il *CFD-BEM.txt* un corrispettivo nei due modelli. Per questo motivo si va ad imporre a STAR, tramite la creazione di *field functions*, di leggere le temperature superficiali dei componenti presenti in entrambi i modelli dal file di soluzione creato da TAITherm ad ogni step richiesto. Al contrario, su TAITherm, si attivano le importazioni dei coefficienti di scambio convettivo. Il processo si ritiene terminato correttamente se l'esecuzione termina con il salvataggio del primo step di calcolo.

• Run

Ottenuta l'inizializzazione, è possibile eseguire il calcolo vero e proprio. Ciò che si va ad impostare nell'ordine è:

- Numero di iterazioni iniziali: questo parametro serve per avere una base convergente del caso aerodinamico con solo gli apporti dei rilasci termici;
- Numero di step di analisi termica: questo parametro indica quante volte viene chiesto a TAITherm una nuova soluzione in base ai dati che i due programmi si scambiano;
- Intervallo tra le analisi termiche: questo parametro permette di definire ogni quante iterazioni (successive a quelle iniziali) STAR e TAITherm devono interfacciarsi;

Il computo delle iterazioni totale è dato da:

 $N_{iniz} + N_{step} \cdot intervallo \Rightarrow es. 3000 + 8 \cdot 500 = 7000 iterazioni$

Il processo può essere quindi riassunto nel diagramma a blocchi proposto nel Grafico 4.1.



Grafico 4.1: Schematizzazione a blocchi del processo simulativo – Modello accoppiato

4.6 COUPLED VS SEGREGATED

A conclusione della descrizione del modello, per verifica si è proceduto con il calcolo utilizzando in uno il modello "coupled flow" e nell'altro quello "segregated flow" e ciò che si è ottenuto è stato quanto riportato nella guida di STAR: per uno stesso numero di iterazioni e di processori a disposizione con il primo modello, si giunge a convergenza con risultati coerenti mentre con il secondo si osserva chiaramente quanto questo sia lontano dalla stabilizzazione. Per osservare ciò, si faccia riferimento ai Grafici 4.2 e 4.3, dove si può notare che a parità di iterazioni, il modello "coupled" riesce a stabilizzarsi notevolmente prima su entrambi i coefficienti aerodinamici. Nota finale: i grafici qui proposti sono stati normalizzati utilizzando il valore medio ottenuto sulle ultime 500 iterazioni del modello "coupled flow". Come si può notare c'è una netta differenza: entrambi i coefficienti nel caso "segregated flow", a parità di iterazioni non sono assolutamente stabili, il che porta a concludere che il modello coupled sia decisamente la scelta da percorrere. Anche le soluzioni dal punto di vista prettamente termico non coincidono, come visibile nella Figura 4.3: qui viene presentata la differenza cella per cella (del solo estrattore) della temperatura ottenuta con i due metodi. Ciò che si osserva è una differenza in alcune zone che varia di ± 50 °C rispetto ai valori ottenuti con il modello coupled. La differenza risiede nel coefficiente di scambio convettivo che essendo importato da STAR risulta essere la causa di tale disparità, pur partendo da un medesimo modello termico iniziale ed a pari condizioni al contorno di velocità e temperatura ambiente.



Figura 4.3: Differenza di temperatura tra i due modelli *Coupled* e *Segregated* su *TAITherm* – Estrattore



Grafico 4.2: Confronto sul Cx normalizzato in funzione del numero di iterazioni tra i due modelli – V = 130 km/h e BS = 10 mm



Grafico 4.3: Confronto sul C_z normalizzato in funzione del numero di iterazioni tra i due modelli – V = 130 km/h e BS = 10 mm

5 CONFRONTO DEI RISULTATI

Nel corso di questo Capitolo verranno esposti i risultati in termini di Δ di differenza tra il caso classico e quello considerando il modello termico completo.

5.1 RISULTATI

Una volta effettuato l'inizializzazione del modello accoppiato STAR-CCM+ e TAITherm, si è potuto procedere con l'esecuzione delle simulazioni. I casi simulati sono stati effettuati al variare della velocità e della *base size*, ma per quest'ultima concentrandosi solo su 3 casi ritenuti più significativi, ovvero le misure 7.5, 10 e 12 mm. Al variare della *base size* si è reso necessario un intervento sul numero totale di iterazioni che, coerentemente con la spiegazione della macro per lo studio termico, prevede l'imposizione di una certa quantità di iterazioni prima dell'ingresso in scena del software TAITherm. Nello specifico:

- Con BS = 12 mm, sono state impostate 3000 iterazioni iniziali e successivamente 10 correzioni termiche ogni 500 passi, per un totale di 7500 iterazioni.
- Con BS = 10 mm, sono state impostate 3000 iterazioni iniziali e successivamente 12 correzioni termiche ogni 500 passi, per un totale di 8500 iterazioni.
- Con BS = 7.5 mm, sono state impostate 3000 iterazioni iniziali e successivamente 14 correzioni termiche ogni 500 passi, per un totale di 9500 iterazioni.

Prima di passare all'analisi dei risultati, nei Grafici 5.1 e 5.2 vengono riportati gli andamenti relativi ai residui, al CFL, velocità massima registrata e *AMG-cycle* a scopo dimostrativo in quanto tutti i casi sono similari a quelli riportati in questi diagrammi. Naturalmente per quanto riguarda la velocità massima, varia il valore massimo in modulo ma non l'andamento del grafico.



Grafico 5.1: Residui – Velocità 170 km/h, base size 10 mm



Grafico 5.2: Velocità 170 km/h, base size 10 mm



Grafico 5.3: C_x e C_z normalizzati in funzione del numero di iterazioni (V = 170 km/h BS = 10 mm) – Modello accoppiato

Come anticipato nella descrizione della fisica nella Sezione 2.4.4, il CFL si stabilizza al valore di 250 prestabilito e i residui sono sufficientemente piccoli e stabili, soprattutto il Tdr ed il Tkr (rispettivamente il tasso di dissipazione e l'energia cinetica turbolente) che hanno piccole variazioni nell'intorno di un valore qualitativamente piccolo. Lo stesso discorso è valido per l'andamento in funzione delle iterazioni di C_x e C_z , i quali dopo alcune oscillazioni iniziali si stabilizzano nell'intorno di un valore. Per la determinazione di tali coefficienti si è considerata la media delle ultime 500 iterazioni su ogni parametro analizzato. Nel Grafico 5.3 si riporta a scopo dimostrativo l'andamento dei coefficienti di C_x e C_z in funzione del numero di iterazioni normalizzato rispetto al valore medio calcolato sulle ultime 500. I risultati (in termini di stabilità dello stesso) mostrati nel Grafico 5.3 sono d'esempio in quanto rappresentativi di tutte le simulazioni calcolate.

5.1.1 Convergenza al variare della base size

Come anticipato precedentemente i risultati sono stati calcolati per quelle tre misure di *base size* e vengono presentati in termini di Δ calcolato come:

$$\Delta C_{x} = (C_{x_{\text{hot}}} - C_{x_{\text{cold}}}) \cdot 100 \qquad \Delta C_{z} = (C_{z_{\text{hot}}} - C_{z_{\text{cold}}}) \cdot 100$$

riassunti nella Tabella 5.1.

(a) ΔC _x %				_	(b) ΔC _z %				
	7.5 mm	10 mm	12 mm	-		7.5 mm	10 mm	12 mm	
130 km/h	0.799	0.921	0.941	-	130 km/h	3.297	3.980	4.059	
170 km/h	0.755	0.868	0.922		170 km/h	3.020	3.265	3.590	
210 km/h	0.732	0.812	0.820		210 km/h	2.593	2.828	3.300	
250 km/h	0.673	0.681	0.689		250 km/h	2.230	2.250	2.410	

Tabella 5.1: Differenze dei coefficienti aerodinamici tra i due modelli

Andando a diagrammare l'andamento dei Δ a fissata *base size* di mesh e al variare della velocità si ottengono gli andamenti proposti nei Grafici 5.4 e 5.1. Interpolando con un'espressione polinomiale lineare del tipo y = ax + b, si ottiene che soprattutto il C_z risente molto dell'aumento di velocità. La motivazione verrà illustrata nel prossimo Capitolo.



Grafico 5.4: Andamento del ΔC_x al variare della velocità a fissata *base size*.



Figura 5.1: Andamento del ΔC_z al variare della velocità a fissata *base size*.

5.2 ANALISI TEMPORALE

Avendo già nella Sezione 3.4 discusso sugli effetti della variazione della dimensione di mesh sui tempi di calcolo, risulta importante mostrare unicamente gli effetti del calcolo accoppiato rispetto al modello classico. Ciò si può esprimere andando a considerare una determinata velocità e dimensione di *base size* nei due modelli e confrontare i tempi di calcolo. Per semplicità nel confronto i dati sono stati normalizzati allo stesso numero di iterazioni e processori utilizzati, in quanto il modello accoppiato è stato eseguito con il doppio dei processori (672). Ciò che si ottiene:

Modello non accoppiato $BS = 10 \text{ mm} \simeq 12 \text{ ore}$

Modello accoppiato $BS = 10 \text{ mm} \simeq 22 \text{ ore}$

dove va specificato che il tempo impiegato nel caso standard considera come già fatto notare in precedenza, oltre al calcolo, sia la generazione della mesh che il post-process, mentre il tempo indicato nel caso con modello termico prevede unicamente il calcolo della simulazione. Tale rapporto di circa il doppio del tempo si mantiene costante per ogni caso simulato. A scopo unicamente informativo si riporta per una velocità (per es. V = 210 km/h) al variare della mesh, senza normalizzazione in base al numero di iterazioni per far comprendere al lettore l'entità reale delle ore di calcolo necessarie per ottenere la corretta convergenza dei casi simulati (Tabella 5.2). Complessiva-

base size	Ore di calcolo	Iterazioni	Numero processori impiegati
7.5 mm	38.8	9500	672
10 mm	18.9	8500	672
12 mm	12.5	7500	672

Tabella 5.2: Ore di calcolo in funzione della mesh – Caso V = 210 km/h

mente, per i 12 casi simulati sono state necessarie un totale di 260 ore, pari a più di 10 giorni di simulazioni *no-stop*. Da questi dati è possibile notare come, utilizzando anche la *base size* intermedia, sono necessarie quasi 19 ore per la sola simulazione con il doppio dei processori rispetto al caso classico. Per meglio comprendere la differenza tra i due modelli, si considerino i dati riportati nella Tabella 5.2: è possibile scalare tali valori in funzione del numero di processori e confrontarli tramite il Grafico 5.5. Risulta subito evidente come per ottenere in entrambi un valore convergente per ciascuna taglia di *base size*, i tempi di calcolo si allunghino notevolmente.



Grafico 5.5: Modello standard ed accoppiato a confronto al variare della BS – Tempi di calcolo (V = 210 km/h)

6 CONCLUSIONIE SVILUPPI FUTURI

In questo Capitolo conclusivo vengono esposte in maniera riassuntiva e motivata le conclusioni e gli eventuali sviluppi futuri, in cui gli ultimi, derivano come normale conseguenza dei risultati ottenuti.

6.1 CONCLUSIONI

Le conclusioni possono essere suddivise in funzione del coefficiente aerodinamico analizzato.

6.1.1 C_x

Per quanto riguarda il coefficiente di resistenza, la variazione in termini di valore assoluto si aggira intorno all'1% per il caso a più bassa velocità e va via via diminuendo raggiungendo circa la metà quando la velocità raggiunge il picco (circa il doppio, si passa da 130 a 250 km/h). In quest'ottica si nota come il maggior apporto energetico nel flusso comporta un'aumento dell'energia che confluisce nella scia. Facendo poi riferimento alle interpolazioni mostrate in Figura 5.4 si può notare una leggera dipendenza dalla velocità.

6.1.2 C_z

Per quanto riguarda il coefficiente di portanza, invece, l'effetto è molto più marcato: si passa da una differenza di circa il 4% per il caso a più bassa velocità e va via via diminuendo raggiungendo circa la metà quando la velocità raggiunge circa il doppio (si passa da 130 a 250 km/h). L'effetto diventa non trascurabile in quanto il maggior apporto termico viene fornito al flusso dalle masse radianti, in particolare dal radiatore che convoglia aria pulita dalla griglia frontale, scambia diversi kW di potenza termica (si parla ci di circa 80 kW alla velocità massima) e inietta tale aria calda tramite la griglia vista inizialmente nella Figura 1.15 nella zona del fondo piatto e quindi nell'estrattore. L'aria è ad una temperatura di prova di 30 °C e dopo il passaggio nel radiatore raggiunge una temperatura di circa 2 volte il valore iniziale e nella Figura 6.1 tale comportamento risulta apprezzabile graficamente.

In quest'ottica, l'aria che si trova tra il fondo piatto ed il suolo subisce un aumento di temperatura che va a modificare la densità del fluido rispetto alla condizione di flusso indisturbato che si può trovare al di sopra del veicolo. Il diffusore si trova a lavorare con un flusso più energizzato: ciò significa che sarebbe consentita una maggiore espansione. A livello puramente qualitativo si può affermare che il flusso caldo rilasciato al di sotto del veicolo, lambisce la quasi totalità della superficie piana creando uno strato d'aria



(a) Globale



(b) Dettaglio

Figura 6.1: Piano di sezione (normale asse y) – Temperature caso 250 km/h BS=10 mm

calda che per diversa densità tende a sollevare la macchina. Facendo poi riferimento alle interpolazioni mostrate in Figura 5.1 si nota che a differenza del coefficiente di resistenza, la dipendenza con la velocità risulta essere ben più marcata: questo perché all'aumentare della velocità il tempo di residenza del flusso diventa sempre minore, diminuendo di conseguenza la possibilità del flusso di scambiare calore. Nella Figura 6.2, si confrontano due casi con medesimo piano di sezione, in funzione della temperatura, si osserva che nonostante la potenza da smaltire aumenti con la velocità¹, le zone ad alta temperatura si allargano, ma il flusso (avendo maggiore velocità) permane

¹ L'impianto meccanico endotermico, per aumentare la velocità della vettura deve aumentare il numero di giri di rotazione del motore, che trascina il compressore e la turbina: ciò significa un aumento dell'energia dissipata sotto forma di calore che deve essere smaltita dall'impianto di raffreddamento in primis e per "lavaggio" da parte del fluido nelle zone raffreddate ad aria.



per meno tempo ad interessare il fondo vettura.

(a) Caso 130 km/h



(b) Caso 250 km/h

Figura 6.2: Piano di sezione (normale asse z) – Temperature del fondo piatto

In termini di coefficiente di pressione, oltre al veicolo, si è scelto un elemento importante come l'estrattore mostrando le differenze, a parità di velocità e mesh, presenti nella Figura 6.3. Naturalmente entrambi i grafici sono privi di valori nominali, ma la *color bar* è settata sul medesimo intervallo. Si può notare come nella zona del fanale posteriore sinistro, dove nel caso standard si può notare la forte asimmetria dovuta al deviatore di flusso nell'estrattore, grazie al maggior apporto energico nella scia, la bolla di ricircolo viene traslata più a valle (Fig. 6.4) permettendo un riassestamento della situazione.



Figura 6.3: Coefficiente di pressione – 210 km/h BS=10 mm



Figura 6.4: Piano di sezione (normale asse y) – Scia 210 km/h BS=10 mm

Risulta possibile discutere analogamente in termini di *skin friction coefficient*, come mostrato nella Figura 6.5, dove a parità di intervallo è possibile evidenziare alcune differenze nel campo di moto attorno al veicolo. Naturalmente, parlando in termini di C_x di una differenza inferiore al 1%, non si evidenziano giustamente grosse difformità ma osservando attentamente le due simulazioni si possono scovare piccoli cambiamenti che globalmente portano al risultato esposto.



(a) Cold case



(b) Hot case

Figura 6.5: Skin friction coefficient – 170 km/h BS=10 mm

Un'ultima riflessione riguarda l'analisi dei costi e dei ANALISI DEI COSTI tempi di simulazione: l'impiego del modello completo di afflusso termico richiede mediamente circa 2 volte il tempo necessario a risolvere la medesima simulazione con il modello standard o, equivalentemente, un numero doppio di processori. Ciò significa per l'azienda un notevole dispiego di forze, senza considerare che rispetto al modello standard (praticamente del tutto automatizzato) il caso termico accoppiato prevede alcuni passaggi descritti nel Capitolo 4 che non possono essere automatizzati del tutto e prevedono l'intervento di un operatore esterno (come per esempio il controllo del corretto accoppiamento in seguito all'inizializzazione tra STAR-CCM+ e TAITherm). Quindi un'analisi di questo tipo risulta essere ben giustificata su mezzi ad alte prestazioni per ottenere risultati il più coerenti possibili con il modello al vero, soprattutto perché il grosso della differenza si ha sul coefficiente di portanza, parametro importante all'aumentare della potenza a disposizione.

INQUINAMENTO Negli ultimi anni, si è posta una notevole attenzione sull'impatto ambientale che ciascun veicolo ha in termini di inquinamento. A livello qualitativo è possibile affermare che mediamente esiste una correlazione tra il coefficiente di resistenza ed i grammi di CO₂ emessi:

$$C_x \downarrow 1\% \implies CO_2 \downarrow 2g$$

Ovvero, per ogni punto percentuale di C_x (centesimo) ridotto, si ha una diminuzione di circa 2 g di C0₂. Risulta naturale quindi, quanto anche in ottica di riduzione delle emissioni, un progetto aerodinamico ben riuscito di un veicolo, oltre a migliorare l'esperienza di guida, permette di consumare meno e conseguentemente rispettare l'ambiente.

6.2 SVILUPPI FUTURI

In conseguenza ai risultati ottenuti si vogliono indicare i possibili sviluppi e analisi future a conferma di quanto ottenuto:

• Verifica sperimentale in galleria del vento: il primo passo di validazione di un modello è la controprova sperimentale. Tuttavia, date le potenze in gioco e le diverse temperature dei componenti, allestire un veicolo con resistenze opportune che riproducano il modello al vero risulta complicato. Il modo più semplice sarebbe l'installazione di un banco dinamometrico frenato in accoppiamento con la bilancia aerodinamica per permettere al veicolo di operare nelle condizioni di utilizzo reale. Naturalmente nascono poi altri problemi legati ai gas di scarico che devono confluire nella scia ed essendo le gallerie del vento automobilistiche di tipo 3/4 open jet a ciclo chiuso (per ragioni di efficienza) risulta complesso il filtraggio dell'aria dalla scia fino al conseguente riutilizzo. In prima battuta potrebbero essere ripetuti gli stessi calcoli effettuati ma su geometrie più semplici (cubi, sfere...) per passare poi al veicolo vero;

- Gli effetti sono stati simulati su un veicolo ad alte prestazioni con fondo piatto ed estrattore: potrebbe essere interessante vedere in funzione della tipologia dell'auto (e quindi delle potenze disponibili) se l'effetto permane o meno. Dall'interpolazione si vede che a bassa velocità (ciclo cittadino o extraurbano), grazie al maggior tempo di residenza del flusso nell'intorno delle sorgenti termiche si ha un incremento dei coefficienti ancora più consistente: da qui nasce l'idea di estendere il discorso qui affrontato a tutte le tipologie di veicolo;
- Il modello descritto nel Capitolo 4 risulta perfettibile: le potenze delle masse radianti sono state imposte (derivanti da prove sperimentali). Sarebbe implementabile un discorso di analisi bifase, studiando il radiatore (ed eventuali intercooler o condensatori) con i propri flussi interni che scambia calore con il flusso d'aria (acqua ad una certa temperatura elevata in ingresso e raffreddata in uscita). In questo modo la potenza termica scambiata, che nella Tesi è stata imposta come valore assoluto, verrebbe calcolata in funzione della portata d'aria e delle temperature dei due fluidi. Discorso simile per la linea di scarico: il modello qui applicato è basato sull'imposizione esterna delle temperature sul condotto (derivanti dai valori delle termocoppie delle prove sperimentali), ma sarebbe possibile modificare il modello e renderlo dipendente dalla portata dei gas combusti (funzione del numero di giri e carico sull'albero motore) in modo che le temperature diventino calcolate. Così facendo si svincola il modello da eventuali approssimazioni in assenza di valori sperimentali;
- Infine, potrebbe risultare interessante valutare l'effetto al variare dell'altezza da terra. La Tesi qui proposta considera il veicolo fisso in un particolare assetto, trascurando quanto appena detto. Dato che l'effetto suolo è tanto più accentuato quanto il volume d'aria al di sotto della macchina è separato dall'ambiente esterno (vedasi discorso sulle minigonne della Sezione 1.3) si ha ragione di pensare che tale parametro influenzi in maniera diretta i risultati.

7 | RINGRAZIAMENTI

A conclusione di questo percorso di studi ed in concomitanza di un importante obiettivo come la Laurea Magistrale, mi sento in dovere di ringraziare le persone che mi hanno accompagnato in questo difficile percorso.

FAMIGLIA Il primo ringraziamento va alla mia Famiglia, a cui devo tutto e che per sempre ringrazierò per avermi concesso la possibilità di raggiungere questo traguardo. A mio padre, Fabio, che mi ha insegnato sin dal primo esame della triennale a non accontentarmi e di puntare sempre in alto e per essere stato una fonte di ispirazione costante: nonostante tutte le difficoltà, trovi sempre il modo di sorridere e risolvere un problema. A mia madre, Maria, per essere la donna più forte che io abbia mai conosciuto, con pazienza e dedizione, sia al lavoro che in casa, mi ha insegnato il valore della fatica, del non arrendersi mai per raggiungere uno scopo. A mio fratello, Lorenzo, per essere quel tocco di semplicità e purezza, caratteristico della sua età, che ci ricorda quanto, nonostante tutto, il mondo sia ancora un posto meraviglioso. Alla mia ragazza, Anna, per essere stata un punto di riferimento e di sostegno, dandomi forza e coraggio, soprattutto nell'ultimo periodo, dove credevo di non farcela più. Un grazie anche a tutto il resto della mia famiglia, nonni, zii e cugini, che vicini o lontani, hanno creduto in me e nel mio percorso.

Un sentito ringraziamento va a tutto il reparto CFD di FCA SPA FCA SPA presso il quale ho svolto l'attività di Tesi. Soprattutto nelle figure degli Ingg. Gautero Matteo e Paola Nicola, per il supporto e la disponibilità dimostrata nei miei confronti. Desidero ringraziare anche tutti i componenti del team, ma nello specifico gli Ingg. Pessa Lorenzo, Pitillo Francesco, Scamardella Gabriele e Tobia Nicola, perché grazie alla loro eccellente preparazione, esperienza e apertura nei miei riguardi, mi hanno permesso di inserirmi senza alcun problema nei complessi meccanismi aziendali e di raggiungere con successo questo risultato. Infine, ci tengo particolarmente a porgere un ringraziamento anche a tutto il personale che compone il team di consulenza esterno, per il supporto tecnico (e morale), che mi hanno gentilmente offerto. In particolar modo vorrei ringraziare gli Ingg. Bratti Giuseppe e Talmelli Marta perché, con i loro preziosi consigli maturati in anni di esperienza, sono riuscito a risolvere diversi problemi dettati dalla poca conoscenza iniziale dei programmi adottati o delle procedure interne.

POLITECNICO DI TORINO Vorrei ringraziare anche il Politecnico di Torino per avermi permesso di collaborare con un'azienda così importante come FCA SPA e soprattutto voglio ringraziare il Prof. Ing. Iovieno Michele, per il tempo, la pazienza e la disponibilità che mi ha concesso nel difficile percorso che ha portato alla redazione di questo documento di Tesi. Il suo contributo, grazie alle sue notevoli conoscenze trasversali, è stato di fondamentale aiuto per la realizzazione finale, suggerendo importanti modifiche che hanno reso completa la Tesi.

Infine un profondo ringraziamento va a tutte quelle persone che AMICIZIE mi hanno accompagnato durante quest'ultimo percorso accademico: in particolare voglio ringraziare il mio collega, ma soprattutto amico, Andrea Quinci, con il quale ho condiviso tutto il percorso sui banchi universitari al quale devo davvero molto, se sono qui oggi. Un'enorme ringraziamento va poi a Federico Borello e Silvia Balachia, compagni di vita e di aperitivo, che grazie al loro modo di fare, mi hanno sempre supportato, regalandomi un sorriso anche nei momenti più difficili. Un grazie anche a Leonardo Stumpo, benché amici da poco tempo e coinquilini per meno, il rapporto creato e le esperienze vissute, universitarie o meno, hanno creato un filo diretto che spero e penso, difficilmente si potrà spezzare in futuro. Grazie a Giuseppe Proto, amico di vecchia data, che mi ha accompagnato lungo questo percorso sin dai primi giorni di università e con il quale ho condiviso veramente tanto. Un grazie poi a Edmondo Lanciotti, Simone Favara, Iacopo Livia, Stefania Civello, Nicola Basso, Andrea Cavalieri, Irene Landi ed a tutte le altre persone, che con la loro presenza si sono rese un tassello importante nella mia vita. Infine ci tengo a ringraziare la Croce Verde di Torino e in particolare la IV squadra dove presto servizio come volontario soccorritore 118. Ogni 9 notti ritrovo persone, amici con cui condividere un'esperienza che insegna molto e soprattutto apre gli occhi su quanto si è fortunati, permettendomi di apprezzare e valorizzare ancora di più la propria vita.

L'ultimo grazie, ma non per importanza, va a te, caro amico Giovanni, che ovunque tu sia ora, sono certo che hai fatto il tifo per me.

BIBLIOGRAFIA

- [1] John D. Anderson. *Fundamentals of Aerodynamics*. A cura di McGraw-Hill. 1991.
- [2] BETA CAE Systems ANSA pre processor[®] User's Guide V. 17.1.1. 2017.
- [3] CD-Adapco STAR-CCM+[®] User's Guide V. 10.06.009. 2015.
- [4] B.J. Daly e F.H. Harlow. «Transport equations of turbulence». In: *Physics of Fluids* 13 (1970), pp. 2634–2649.
- [5] P. A. Durbin. «On the k-e stagnation point anomaly». In: *Int. J. Heat and Fluid Flow* (1996), pp. 17, 89–90.
- [6] Weiss J.M. e Smith W.A. *Preconditioning applied to variable and constant density flows*. A cura di AIAA Journal. 1995, pp. 2050–2057.
- [7] T. Jongen. *Simulation and Modeling of Turbulent Incompressible Flows*. A cura di Lausanne EPFL Thesis. 1998.
- [8] D. B. Spalding. *Calculation of turbulent heat transfer in cluttered spaces*. Proc. 10th Int. Heat Transfer Conference, Brighton, UK, 1994.
- [9] ThermoAnalytics TAITherm[®] User's Guide V. 12.2. 2016.
- [10] Maruszewski J.P. Weiss J.M. e Smith W.A. Implicit solution of preconditioned Navier-Stokes equations using algebraic multigrid. A cura di AIAA Journal. 1999, pp. 29–36.