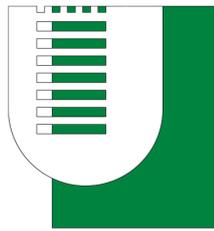


FACOLTÀ DI INGEGNERIA



TOR VERGATA
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA

TESI DI LAUREA IN
INGEGNERIA MECCANICA

**Ottimizzazione aerodinamica di una
MotoGP mediante CFD e Mesh
Morphing.**

Relatore:

Prof. Marco E. Biancolini

Correlatore:

Ing. Stefano Porziani

Candidato:

Filippo Ricci

Anno Accademico 2022/2023

Sommario

Questa tesi ha per oggetto l'analisi e l'ottimizzazione fluidodinamica di una motocicletta da MotoGP, analizzata in una galleria del vento virtuale. Ho così avuto la possibilità di approfondire conoscenze di fluidodinamica applicata alle competizioni motociclistiche, campo di mio stretto interesse personale.

In particolare, si fa ricorso alla fluidodinamica computazionale per massimizzare le prestazioni e la sicurezza della motocicletta, modificandone esclusivamente alcune geometrie e supponendo di mantenere inalterate le restanti caratteristiche tecniche.

Gli obiettivi sono: ridurre il coefficiente di resistenza aerodinamica per massimizzare la velocità e minimizzare il dispendio energetico; ridurre il coefficiente di portanza, che influenza negativamente la stabilità e la sicurezza della motocicletta, soprattutto alle alte velocità.

Il progetto prevede una prima fase di creazione e validazione di un modello fluidodinamico che rappresenti accuratamente la motocicletta e le sue caratteristiche fisiche, unitamente all'analisi dei risultati che ne derivano, al fine di identificare le zone di potenziale miglioramento.

Per fare ciò si utilizza una griglia computazionale (in inglese mesh), ossia una discretizzazione dello spazio circostante la motocicletta, la quale dipende dalle geometrie di quest'ultima. Questa operazione è necessaria a rendere calcolabili i relativi parametri fluidodinamici.

Nella seconda fase si passa a simulare modifiche delle geometrie della motocicletta nei punti critici rilevati, attraverso la relativa rimodellazione della mesh. Questa tecnica è detta Mesh Morphing e viene implementata attraverso l'utilizzo del software RBF Morph.

Ciò consente di verificare virtualmente le conseguenze fluidodinamiche delle modifiche apportate, senza dover ricostruire un nuovo modello, consentendo un notevole risparmio di tempo e risorse per il suo sviluppo.

Conclusa la fase di modifica delle singole zone prese in considerazione, si verifica la loro influenza sulle grandezze aerodinamiche oggetto di studio e si dimostra che le loro variazioni possono essere discordi, dunque da ponderare accuratamente.

Infine, si simula la sovrapposizione di più modifiche, per verificarne la qualità dell'interazione, ovvero la risultante dei contributi.

In generale, questo lavoro sottolinea la sostanziale influenza dell'aerodinamica ai fini della prestazione sportiva, dimostrando l'imprescindibile valore aggiunto dei software di fluidodinamica computazionale, per i quali restano comunque fondamentali conoscenza, esperienza e creatività, ancor meglio se accompagnate da autentica passione.

Indice

1	La fluidodinamica	3
1.1	Richiami di fluidodinamica	3
1.2	Importanza e settori d'interesse	7
1.3	Storia dell'aerodinamica nel motociclismo	8
1.4	L'aerodinamica per le motociclette moderne	11
2	Equazioni e metodi numerici per simulazioni CFD	17
2.1	Modus operandi e vantaggi della fluidodinamica computazionale	17
2.2	Equazioni d'interesse	19
2.3	Problema di chiusura delle equazioni di Navier-Stokes e utilizzo delle RANS	22
2.4	Modelli matematici	24
2.5	Il modello $k - \omega$ SST	26
3	Ottimizzazione tramite Mesh Morphing	27
3.1	Strumenti software utilizzati	27
3.2	Il modello CFD: condizioni iniziali e obiettivi di ottimizzazione .	28
3.3	Impostazione del modello CFD	29
3.4	Validazione del modello e obiettivi di ottimizzazione	32
3.5	RBF Morph e il Mesh Morphing	35
3.6	Ottimizzazione 1: abbassamento del casco	38
3.7	Ottimizzazione 2: ridimensionamento carenatura	43
3.8	Ottimizzazione 3: inclinazione carena inferiore	50
3.9	Ottimizzazione 4: allargamento codone	57
3.10	Ottimizzazione 5: traslazione verticale codino	64
3.11	Unione ottimizzazioni	73
4	Analisi dei risultati	78
4.1	Risultati finali e confronti con gli obiettivi di ottimizzazione . .	78
4.2	Sviluppi futuri	80

1 La fluidodinamica

1.1 Richiami di fluidodinamica

La fluidodinamica è una specializzazione della meccanica in cui si studia il comportamento dei fluidi in movimento e le cause che ne determinano il moto. Il modus operandi per affrontare un problema fluidodinamico consiste nella risoluzione di equazioni differenziali, per via analitica o numerica. Si otterranno, così, le grandezze fisiche del fluido e si potrà procedere ad un'analisi dei risultati.

Si definisce fluido lo stato della materia in cui le particelle sono debolmente legate le une alle altre e quindi non conferiscono all'oggetto una forma costante, ma quest'ultima dipenderà da condizioni esterne. Ciò nonostante si suppone che il fluido, inizialmente compatto, rimarrà tale anche a seguito di uno sforzo di taglio.

In particolare i fluidi che in quiete reagiscono ad una sollecitazione di taglio in maniera proporzionale alla velocità di deformazione e non in funzione della deformazione stessa (come vale invece per i solidi) vengono detti fluidi newtoniani e rispettano la legge di Newton per i fluidi:

$$\tau = -\mu \frac{dv}{dy} \quad (1)$$

in cui μ è il termine che indica cosiddetta viscosità dinamica e indica la resistenza che il fluido oppone ad uno sforzo di taglio applicato su di esso. In particolare, nel caso di un fluido in movimento rispetto ad una superficie ferma, si può definire μ come la resistenza del fluido all'avanzamento rispetto alla superficie stessa.

Il valore di μ dipende da:

- stato di aggregazione del fluido: liquido o gassoso.
- caratteristiche meccaniche del fluido: dalla forze di coesione tra le molecole (per i liquidi) o dall'entità delle collisioni tra le particelle libere di muoversi (per i gas).
- temperatura: nei liquidi all'aumentare della temperatura la viscosità dinamica diminuisce, mentre nei gas aumenta a causa del maggior numero di collisioni che subiscono le particelle.

Oltre alla viscosità dinamica si può definire un altro tipo di viscosità, detta viscosità cinematica, definita come rapporto tra la viscosità dinamica e la densità del fluido:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2)$$

Un'ulteriore distinzione di fondamentale importanza per intraprendere un'analisi fluidodinamica è quella tra flusso laminare e flusso turbolento di un fluido.

Si definisce flusso laminare il moto di un fluido in cui le caratteristiche fisiche macroscopiche (come, ad esempio, la velocità) sono determinate esclusivamente dall'ambiente esterno in ogni punto del fluido e in ogni istante del suo moto, quindi saranno sempre le stesse ogni volta che si ripete la misurazione nelle medesime condizioni dell'ambiente esterno.

Il nome flusso laminare deriva dalla forma con cui si rappresentano i cosiddetti filetti fluidi che costituiscono il fluido in moto, ossia delle linee che rappresentano lamine di fluido, le quali rimangono sempre parallele tra loro, senza mescolarsi.

Invece, quando si parla di flusso turbolento, le proprietà macroscopiche del fluido dipendono dal particolare punto dello spazio e dal particolare istante di tempo in cui viene misurato il fenomeno, e il nome deriva dal fatto che si rappresenta tale situazione utilizzando dei vortici, nei quali il fluido si rimescola. Analiticamente si può distinguere il moto di un fluido in regime laminare da uno turbolento attraverso il numero di Reynolds:

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} = \frac{v L}{\nu} \quad (3)$$

In questa equazione compaiono le grandezze precedentemente menzionate, tra cui la viscosità dinamica μ , perciò è evidente che il numero di Reynolds dipenderà in particolare dalla pressione, dalla temperatura e dalla velocità del fluido.

Inoltre il numero di Reynolds è particolarmente importante per gli studi fluidodinamici poiché consente di riprodurre in scala dei fenomeni reali (ad esempio utilizzando una galleria del vento per simulare il moto di un oggetto nell'aria) senza perdita di precisione, ma semplificandone notevolmente la realizzazione. Senza perdita di generalità, si può immaginare il fluido come una sovrapposizione di strati infinitesimi. È quindi evidente che se due strati adiacenti non hanno la stessa velocità, quello più lento tenderà a rallentare quello più veloce. Questo succede in particolare quando il fluido è in contatto con una superficie ferma, poiché in assenza di lavoro esterno, il coefficiente di viscosità dinamica ostacolerà il moto del fluido fino a farlo arrestare in prossimità della superficie. Tale comportamento va sotto il nome di principio di aderenza e può essere rappresentato nel modo seguente:

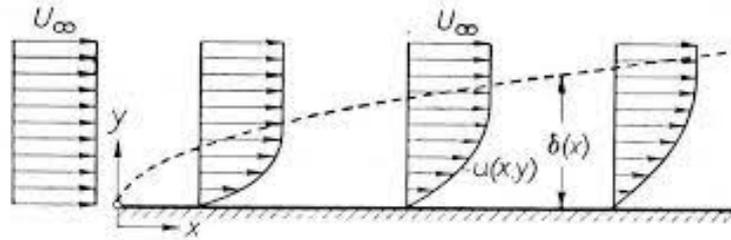


Figura 1: *Andamento della velocità di un fluido in funzione della distanza dalla superficie ferma [1].*

In questo disegno è possibile notare il cosiddetto strato limite del fluido, ossia quella regione in cui la velocità dei filetti di fluido passano da una velocità nulla a quella della corrente indisturbata; rappresenta, cioè, la porzione di fluido che subisce un rallentamento a causa della parete ferma sulla quale sta scorrendo. La conoscenza dell'andamento dello strato limite di un fluido risulta di fondamentale importanza per prevedere grandezze fisiche come, ad esempio, lo sforzo di taglio a contatto con la parete, la pressione superficiale e i gradienti di pressione. Lo strato limite può a sua volta essere suddiviso in tre zone: sotto-strato viscoso, strato logaritmico e strato esterno.

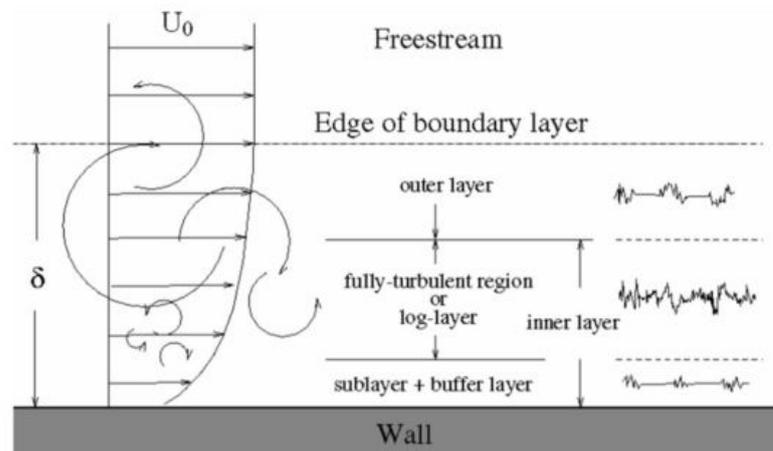


Figura 2: *Schematizzazione dello strato limite di un fluido [2].*

La risoluzione dello strato limite in prossimità di una superficie (detta anche parete) è un aspetto critico nelle analisi fluidodinamiche, in quanto fornisce informazioni cruciali sul flusso di fluido, come l'entità dello sforzo di taglio a contatto con la parete, la distribuzione della pressione superficiale e gli effetti complessivi di forze e gradienti di pressione.

Nell'ambito dello sviluppo di veicoli come automobili o motociclette, ad esempio, comprendere il comportamento dello strato limite del flusso è fondamentale

quando si vogliono valutare e ottimizzare gli effetti del flusso d'aria attorno al veicolo stesso, o attorno ad appendici aerodinamiche studiate appositamente. In tal caso sarà necessario prevedere con precisione quanto siano significative le forze generate dalle superfici, al fine di evitare effetti indesiderati come la perdita di aderenza con la strada. Questo può essere cruciale per garantire la sicurezza e le prestazioni del veicolo.

1.2 Importanza e settori d'interesse

L'aerodinamica è di fondamentale importanza per lo studio e lo sviluppo tecnologico di diversi settori dell'ingegneria, in particolare in quello motoristico, in cui i dettagli sono sempre più influenti ai fini della prestazione sportiva.

Quando si parla di aerodinamica, uno dei primi settori a cui pensiamo è l'ingegneria aerospaziale, dove è fondamentale per la progettazione di aeromobili e velivoli spaziali performanti e sicuri. Infatti è possibile perfezionare l'andamento dei flussi d'aria attorno ai velivoli in movimento ed ottenere, ad esempio, una riduzione della resistenza aerodinamica in fase di decollo, quindi ridurre i consumi di carburante, oppure per generare maggiore portanza e consentire all'aeromobile di decollare più agevolmente ed avere maggiore stabilità in caso di turbolenze atmosferiche.

Anche nel settore edile si deve considerare l'interazione tra struttura e flussi d'aria che investono l'edificio: se da un lato può essere utile curare aspetti funzionali come una migliore ventilazione naturale o una maggiore efficienza energetica, si potrebbe incorrere in fenomeni come la risonanza, dannosi per mantenere l'integrità strutturale degli edifici.

Approfondire studi fluidodinamici risulta fondamentale anche per fini ambientali, come per la realizzazione di pale eoliche efficienti o rotori di turbine per impianti idroelettrici, in grado di trasformare l'energia cinetica del vento o dell'acqua in energia elettrica, con minor impatto ambientale.

Perfino in molte discipline sportive come l'atletica, il ciclismo e il nuoto, la fluidodinamica ricopre un ruolo importante, poiché l'atleta deve confrontarsi con aria o acqua nello svolgimento della sua prestazione sportiva, e il modo in cui ciò avviene può essere determinante per il risultato finale.

Anche nel settore automobilistico l'aerodinamica ha da sempre avuto notevole importanza nella progettazione di veicoli, soprattutto se destinati alle competizioni. Gli obiettivi sono senz'altro la velocità, la stabilità e l'efficienza energetica, ovvero nello sviluppo di autoveicoli ad uso quotidiano, ad esempio per aumentare il comfort del guidatore, attraverso la riduzione del rumore o delle vibrazioni della vettura in movimento.

Mentre per le competizioni automobilistiche l'aerodinamica ha sempre ricoperto un ruolo importante (basti pensare alle innovazioni introdotte negli anni '70 nella Formula 1), nel motociclismo non ha avuto grande sviluppo fino a una decina d'anni fa, quando la Ducati progettò la prima MotoGP con appendici aerodinamiche. Da quel momento, lo studio dell'aerodinamica ha iniziato ad avere un ruolo sempre maggiore anche nelle motociclette, oggetto di questo studio.

1.3 Storia dell'aerodinamica nel motociclismo

Benché l'aerodinamica per le motociclette non abbia avuto un grande sviluppo fino ad una decina d'anni fa, nel passato furono comunque tentate soluzioni storicamente rilevanti.

La Moto Guzzi tra il 1955 e il 1957 produsse la celebre GP 500 8 cilindri, una vera e propria sfida aerodinamica seguita dall'ingegner Giulio Cesare Carcano. Grazie ad un motore ad 8 cilindri a V di 90 gradi e ad un'ampia carenatura anteriore riuscì a registrare numeri ancora oggi significativi: si parla di un motore da 72 cavalli, in grado di portare la motocicletta a un massimo di 275 km/h.

Anche nel nord Europa ci sono stati progetti di carenature interessanti: in particolare la Royal Enfield, che nel 1965 promuoveva la sua Crusader 250 con l'innovativa carenatura, dichiarava un aumento della velocità massima pari all' 8%, un risparmio di carburante del 20% e, soprattutto, una eccellente protezione per il pilota in caso di agenti atmosferici avversi. Inoltre, nelle



Figura 3: a sinistra la Moto Guzzi V8 500 GP guidata da Ken Kavanagh [3], mentre a destra la pubblicità della Royal Enfield Crusader 250 [4].

corse degli anni '50, la carenatura veniva utilizzata ampiamente per ridurre la resistenza aerodinamica ma, pochi anni dopo venne vietata per motivi di sicurezza, poiché l'influenza della carenatura in presenza di forte vento laterale risultava particolarmente negativa, rendendo la motocicletta inguidabile.

Sul finire degli anni '70, anche in Giappone ci furono dei tentativi di implementare un'aerodinamica efficace.

La Yamaha, insieme al geniale fisico e pilota Rodger Freeth, tentò un esperimento aerodinamico su una delle sue moto di punta, la TZ 750. Su quest'ultima vennero montati due alettoni molto simili a quelli utilizzati già da anni sulle vetture di Formula 1, rispettivamente uno sulla carenatura anteriore e l'altro sul codino posteriore, dietro al pilota. Sfortunatamente però l'esperimento

non ebbe grande successo, poiché nelle fasi di piega la downforce generata dagli alettoni fissi spingeva la moto verso l'esterno della curva, rendendo difficoltosa la guida e annullando il vantaggio che si otteneva sui tratti rettilinei.

In Suzuki, invece, optarono per delle appendici simili a piccole ali sulla parte frontale della carenatura della RG 500, guidata in quegli anni da Mike Hailwood. Pur essendo questo tentativo quello meno invasivo, fu quello più bilanciato e dava complessivamente più vantaggi.



Figura 4: A sinistra Rodger Freeth su Yamaha TZ 750 [5], a destra Mike Hailwood su Suzuki RG 500 [6].

Dopo questi esperimenti lo sviluppo delle appendici aerodinamiche sulle motociclette non ha più avuto grossi sviluppi fino al 2010, quando la Ducati ha ripreso l'idea delle alette sulla carenatura anteriore applicandola alla MotoGP. Nonostante le difficoltà iniziali di adattamento dei piloti alle differenti dinamiche di guida della motocicletta, questo tentativo ha segnato l'inizio della moderna sfida aerodinamica nelle competizioni della MotoGP.

Il rapido sviluppo delle tecnologie e delle potenze dei calcolatori elettronici in pochi anni ha consentito di raggiungere livelli elevatissimi di sofisticazione aerodinamica. Ne è un esempio lampante l'attuale Ducati Desmosedici GP23, guidata da Francesco Bagnaia ed Enea Bastianini. È evidente il progresso tecnologico che è stato fatto in poco più di un decennio.



Figura 5: Confronto tra Ducati Desmosedici GP11 (a sinistra, [7]) e Ducati Desmosedici GP23 (a destra, [8]).

1.4 L'aerodinamica per le motociclette moderne

Poiché ai fini dell'efficienza aerodinamica la sezione frontale di un oggetto in movimento (ossia la superficie che si oppone al movimento del flusso d'aria) è uno dei parametri più influenti, confrontando una moto e una macchina si potrebbe pensare che la minore superficie della moto le permetta di vincere il confronto.

Questo è vero, ma ci sono anche altri parametri da considerare, quali ad esempio il fatto che le ruote sono scoperte, i profili più irregolari, i componenti come le forcelle o le linee di scarico sono più esposti e, soprattutto, il fatto che il pilota sia costantemente in movimento sulla moto. Questi aspetti influenzano negativamente il flusso d'aria che attraversa la moto, riducendone l'efficienza aerodinamica poiché rendono estremamente difficile l'adesione dell'aria alle superfici, fino a far separare i flussi tra loro, innescando turbolenze e vortici che generano resistenza all'avanzamento. Per questi motivi il coefficiente di resistenza di una moto rientra solitamente tra 0,4 e 0,9, ben maggiore di quello di una macchina moderna che oscilla tra 0.25 e 0.5. Oltre a ciò, se si considera anche il fatto che generalmente le motociclette hanno un motore meno potente di quello delle automobili, la sfida all'ottimizzazione aerodinamica diventa ancora più grande e avvincente per un confronto ideale.



Figura 6: *Confronto tra una motocicletta [9] e un'automobile [10] in galleria del vento.*

Tuttavia, quando si cerca un miglioramento aerodinamico per una motocicletta, non si deve tener conto solo del coefficiente di resistenza aerodinamica. Un altro aspetto importante sta nella portanza che le superfici della moto generano in movimento. Infatti, avendo un centro di pressione più alto rispetto alle automobili, un peso minore e un passo (distanza tra asse anteriore e posteriore) inferiore, le moto hanno una maggiore tendenza all'impennata nelle fasi di accelerazione. Questo fenomeno è chiaramente dannoso, poiché riduce, fino ad annullarlo, il contatto tra ruota anteriore e asfalto, rendendo di fatto la motocicletta molto più instabile e pericolosa. Se prima questo problema era

gestito in gran parte dall'elettronica, negli ultimi anni neppure questi avanzati accorgimenti sembrano essere sufficienti, visti i rilevanti incrementi di potenza dei motori.

Anche in questo caso torna utile l'aerodinamica, con una soluzione semplice ed efficace, rappresentata dalla ottimizzazione della downforce che le superfici della motocicletta generano, facendo ricorso ad appendici aerodinamiche, dette ali. Infatti, così facendo la moto subisce una spinta verso il basso dall'aria che la attraversa, rafforzando il contatto tra gomma anteriore e asfalto. D'altro canto, la varietà e la complessità dei movimenti attuabili dal sistema moto-pilota in un reale giro di pista rendono molto difficile lo sviluppo di appendici aerodinamiche che portino solo benefici in termini aerodinamici. Infatti, quando il pilota affronta una curva, la motocicletta viene inclinata verso l'interno della curva, formando un angolo (variabile nel tempo e con la velocità) rispetto alla superficie dell'asfalto. Chiaramente anche le appendici aerodinamiche, solidali con la moto, modificheranno il loro angolo di incidenza rispetto all'asfalto, perciò la downforce che genereranno non avrà solamente componente ortogonale all'asfalto ma anche parallela, responsabile di una spinta della moto verso l'esterno della curva. Va da sé che più la moto rimane prossima alla posizione di ortogonalità rispetto all'asfalto, minore sarà la componente "indesiderata" della downforce. Inoltre, per far sì che la moto curvi, è necessario che il baricentro del gruppo moto-pilota si trovi verso l'interno della curva, perciò i piloti spingono il loro corpo verso l'interno della curva, complicando ulteriormente il quadro aerodinamico complessivo.

Per questi motivi la portanza aerodinamica (in questo caso detta anche deportanza, poiché diretta nello stesso verso dell'accelerazione di gravità) ricopre un ruolo fondamentale nella progettazione di una motocicletta performante aerodinamicamente ma allo stesso tempo sicura e stabile durante la guida.

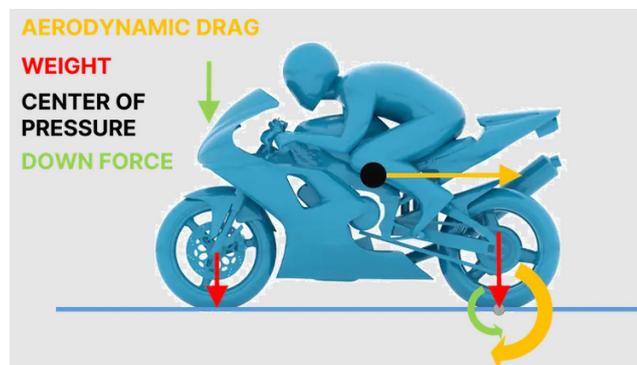


Figura 7: La downforce per evitare l'impennata [11].

Le considerazioni fatte fin ora hanno come ipotesi semplificativa che vento e moto che si muovano parallelamente tra loro. Come detto precedentemente,

nella progettazione delle motociclette bisogna, però, anche considerare altri fattori, come la riduzione della sensibilità della moto al vento laterale. Anche in questo caso la resistenza aerodinamica può peggiorare per via della maggiore superficie esposta al flusso d'aria, ma soprattutto potrebbe generare forze laterali che possono alterare repentinamente la traiettoria della motocicletta. Se nelle barche a vela si muove la vela cercando di massimizzare la spinta del vento sull'imbarcazione, nel caso delle motociclette questo effetto è indesiderato per motivi di sicurezza, oltre che di performance. Ciò detto per sottolineare l'importanza del contesto in questo tipo di studi.

Poiché, però, nella realtà la posizione della motocicletta cambia costantemente e le condizioni del vento sono pressoché imprevedibili, questo parametro si tiene in scarsa considerazione negli studi aerodinamici; invece ci si concentra sul caso in cui vento e motocicletta risultano paralleli tra loro.

Anche se apparentemente disgiunti, un flusso d'aria ben controllato attorno alla motocicletta consente di ottimizzare la potenza del motore. Infatti le prese d'aspirazione dell'aria del motore dovrebbero essere posizionate possibilmente nei punti in cui la pressione sulla moto è maggiore: più quest'ultima sarà elevata, più aumenterà la densità dell'aria che entra nel motore, che potrà bruciare più carburante, generando più potenza. Questa tecnica è detta effetto "ram-air" ed è stata sfruttata in un'ampia gamma di applicazioni. Di contro, investire significativamente nell'ottimizzazione aerodinamica per incrementare la potenza del motore porta solo parzialmente dei benefici, poiché bisogna valutare se avere un incremento di potenza non comprometta l'efficienza aerodinamica complessiva della moto. Per questo motivo, a volte, è preferibile sacrificare in parte l'ottimizzazione della potenza assoluta del motore, in favore di una migliore efficienza aerodinamica, anche per una questione di affidabilità del motore.

Altro aspetto da considerare è quello del raffreddamento del motore e dei freni della motocicletta. Poiché naturalmente i fluidi tendono a spostarsi da aree a pressione maggiore verso aree a pressione inferiore (gradiente di pressione favorevole) avere zone ad alta pressione davanti ai radiatori della motocicletta consente di aumentare il gradiente di pressione e quindi di indirizzare il flusso d'aria calda verso zone più lontane dai componenti caldi. Si ottiene così un flusso d'aria che disperde il calore in eccesso, migliorando sia le prestazioni sia l'affidabilità del veicolo.

Discorso analogo per il raffreddamento dei freni, che raggiungono temperature elevate e, quindi, necessitano anche di una migliore dispersione termica per rimanere efficienti. Per fare ciò sono già in utilizzo dei convogliatori d'aria (detti "air scoop") che si montano sulle forcelle anteriori e che modificano la

direzione del flusso d'aria nella regione circostante convogliandola sulle pinze dei freni. In tal modo, analogamente a quanto detto per il radiatore, il calore tenderà naturalmente a sfruttare il gradiente di pressione e allontanarsi dall'impianto frenante.

A fronte di tutte queste considerazioni, è pressoché certo che gli sviluppi aerodinamici saranno sempre più interessanti per le case produttrici, sia nel settore delle competizioni, sia nel mercato consumer, per garantire prodotti di qualità, efficienti e piacevoli da guidare anche per i meno esperti.

In ogni caso, la prima cosa da identificare è il tipo di motocicletta che vogliamo ottimizzare, poiché tale scelta influenzerà gli obiettivi dello studio. Chiaramente, quando si parla di aerodinamica, le moto da corsa sono quelle che possono trarre i maggiori vantaggi da uno studio di questo tipo, poiché raggiungono velocità maggiori.

Le motociclette da corsa sono pensate per competere in gare che si svolgono su piste asfaltate chiuse al traffico e appositamente costruite per garantire la sicurezza dei piloti. Queste piste hanno un alto numero di curve e rettilinei, perciò la velocità massima e l'agilità tra le curve sono elementi chiave. Tra le corse su pista ci sono diverse categorie, in base alle caratteristiche tecniche delle moto che possono partecipare. La caratteristica principale che distingue le categorie è la cilindrata del motore, perciò si parte dai campionati a cui partecipano moto con cilindrata dai 70cc, fino ad arrivare alle classi con cubature da 1000 cc.

In particolare, a livello mondiale, ci sono due classi massime principali: la MotoGP, una categoria a cui partecipano esclusivamente prototipi e con un regolamento che lascia agli ingegneri la possibilità di avere grossi margini di innovazione e sviluppo tecnologico; e la Superbike (WSBK), dove, invece, l'obiettivo è essere più competitivi possibile utilizzando moto di derivazione stradale, con un regolamento più stringente e un margine di modifica più basso, affinché i costi di sviluppo siano più contenuti possibile.

Poiché l'obiettivo di questa tesi è quello di fornire degli spunti non regolamentati di miglioramento dell'aerodinamica, si è scelto di simulare le modifiche per un modello di moto vicino alle caratteristiche di una MotoGP, proprio per il suo carattere prototipale.

È noto che per studiare l'aerodinamica di una moto, uno dei metodi più utilizzati è la galleria del vento, dove si posiziona anche il pilota (o piloti di varie altezze per avere uno studio più dettagliato), quindi si genera un flusso d'aria controllato e si raccolgono i dati a differenti velocità dell'aria. Il principio che c'è dietro è una sorta di inversione cinematica, poiché si mantiene ferma la moto e si fa muovere il flusso d'aria circostante. Così facendo si ha un notevole

vantaggio logistico ed economico rispetto a portare la moto e i relativi sensori su un tracciato, e risulta essere un'ottima approssimazione della realtà.

Da uno studio in galleria del vento si possono raccogliere prevalentemente due tipi di dati: i sensori (detti celle di carico) rilevano la forza esercitata dall'aria su vari punti della moto e del pilota, mentre l'utilizzo di gas visibili anche ad occhio nudo rende possibile la visualizzazione dell'andamento dei flussi d'aria che attraversano il sistema moto-pilota, ed evidenziano le turbolenze presenti. Tuttavia, grazie alle sempre maggiori potenze di calcolo e alla migliore modellazione, è sempre più utilizzato un approccio "virtuale" allo studio aerodinamico di una moto. Questo consiste nella simulazione delle condizioni presenti in galleria del vento attraverso l'utilizzo degli strumenti software di CAE (Computer Aided Engineering) e CFD (Computational Fluid Dynamics).

A prescindere dal modus operandi scelto per effettuare uno studio aerodinamico, è indispensabile specificare i parametri di maggiore interesse, affinché si possa valutare la bontà delle modifiche apportate con costi di calcolo sostenibili.

Ricordato che la principale distinzione che riguarda i dati provenienti dalle celle di carico (o delle simulazioni CFD) è nella direzione in cui il fluido e l'oggetto si scambiano le forze, da un lato avremo la resistenza all'avanzamento (o "drag", in direzione parallela al moto del fluido) e dall'altro le forze di portanza (o "lift", in direzione ortogonale al moto del fluido). In base alle esigenze di progetto si cerca di intervenire su questi due parametri.

Per le moto da corsa, anni fa le potenze erano relativamente contenute, dunque l'obiettivo era quello di ridurre il più possibile il coefficiente di resistenza all'avanzamento, in modo da raggiungere velocità massime più elevate, tenendo poco in considerazione gli effetti delle forze di portanza. Negli ultimi anni, invece, poiché le potenze erogate dai motori stanno diventando sempre maggiori, la gestione delle moto tende ad essere problematica soprattutto nella fase di accelerazione. Per questo motivo, anche il coefficiente di lift (chiamato anche coefficiente di portanza, o di deportanza, a seconda della direzione discorde o concorde con la forza di gravità) sta diventando un parametro aerodinamico fondamentale: oggi, per avere una moto aerodinamicamente prestante, siamo interessati a minimizzare la resistenza all'avanzamento e a minimizzare anche l'effetto di portanza.

Come spesso succede nei problemi ingegneristici, bisogna trovare un giusto compromesso tra le due forze, poiché il miglioramento di una il più delle volte implica la diminuzione dell'altra.

Il coefficiente di resistenza all'avanzamento, detto C_d , è un parametro adimensionale che indica la resistenza che un corpo oppone al moto in un fluido. Nel

caso di un veicolo è il rapporto tra la forza di resistenza aerodinamica e la pressione dinamica del fluido. In altre parole, il C_d è una misura della capacità di un oggetto di penetrare attraverso l'aria, ed è definito come:

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2}\rho v^2 A} \quad (4)$$

dove: F_d è la forza di resistenza aerodinamica, ρ indica la densità dell'aria, v la velocità d'avanzamento nel moto relativo tra il corpo e il fluido che lo circonda e A la superficie frontale del corpo.

Analogamente, il coefficiente di portanza aerodinamica C_l è un numero adimensionale definito dal rapporto tra la forza di portanza (F_l) generata e il prodotto tra la pressione aerodinamica del flusso indisturbato, moltiplicato per l'area frontale del corpo

$$C_l = \frac{F_l}{\frac{1}{2}\rho v^2 A} \quad (5)$$

in cui sono presenti gli stessi termini del coefficiente di resistenza all'avanzamento.

Dato che C_l e C_d sono collegati tra loro, si preferisce utilizzare un ulteriore parametro per valutare complessivamente sia gli effetti del drag che del lift, ossia l'efficienza aerodinamica di un corpo:

$$e = \frac{C_l}{C_d} \quad (6)$$

che indica il rapporto tra la portanza e la resistenza di un corpo.

Noti i coefficienti di drag e di lift, si può facilmente passare al calcolo delle relative forze, detta forza di resistenza aerodinamica (o drag force):

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho v^2 A \quad (7)$$

e forza di portanza (o lift force):

$$F_l = \frac{1}{2} C_l \rho v^2 A \quad (8)$$

2 Equazioni e metodi numerici per simulazioni CFD

2.1 Modus operandi e vantaggi della fluidodinamica computazionale

Per poter effettuare un'analisi accurata dei fenomeni fluidodinamici, potersi affidare ai sempre più potenti strumenti di calcolo elettronico rappresenta sicuramente il principale vantaggio per avere risultati con elevato grado di precisione e in tempi particolarmente interessanti.

L'acronimo "CFD" sta per "Computational Fluid Dynamics", ossia lo studio computazionale della dinamica dei fluidi ed è una disciplina dell'ingegneria e della fisica che si occupa di simulare e analizzare il comportamento dei fluidi (liquidi e gas) mediante l'uso di modelli matematici, utilizzando i sempre più potenti strumenti di calcolo, che altrimenti non potrebbero essere risolti poiché le variabili coinvolte sono numerose e difficili da controllare singolarmente.

Le simulazioni effettuate con analisi CFD danno la possibilità di intervenire sui parametri che influenzano il flusso dei fluidi senza dover effettuare concretamente costosi e complicati test sperimentali.

Il workflow di un'analisi CFD solitamente prevede:

- **Definizione delle equazioni fondamentali della fluidodinamica:** la CFD si basa sulle equazioni fondamentali della fluidodinamica, ossia le cosiddette equazioni di Navier-Stokes. Si avrà a che fare con un set di equazioni differenziali, tra cui le equazioni di conservazione della massa, le equazioni di conservazione del momento e le equazioni di conservazione dell'energia. Queste equazioni descrivono il moto del fluido e le variazioni delle sue caratteristiche (velocità, pressione, temperatura, ecc.) in funzione dello spazio e del tempo.
- **Discretizzazione:** per risolvere le precedenti equazioni in modo numerico è necessario discretizzare lo spazio e il tempo in una griglia finita (in inglese "mesh") composta da celle o elementi finiti e nodi, tramite i quali è possibile approssimare le grandezze continue (come la velocità e la pressione) in punti discreti nella griglia. La grandezza della mesh e la sua qualità possono incidere significativamente sulla qualità del risultato finale della simulazione.
- **Modelli matematici:** per calcolare i valori delle grandezze in ogni punto della mesh, vengono utilizzati dei modelli matematici che determinano

come le grandezze sono interpolate nella mesh e come vengono calcolati i loro cambiamenti vengono calcolati nel tempo. L'utilizzo di modelli differenti può influenzare la stabilità e l'accuratezza delle simulazioni.

- **Condizioni al contorno:** le condizioni al contorno riguardano prevalentemente i bordi del dominio di simulazione e definiscono parametri come il comportamento del flusso in prossimità dei bordi del dominio o grandezze fisiche (quali velocità, pressione o temperatura) del fluido nelle varie zone del dominio (entrata, uscita o all suo interno). Queste condizioni sono fondamentali per modellare correttamente il sistema.
- **Turbolenza:** la scelta del modello di turbolenza è un altro aspetto importante nelle CFD, specialmente in applicazioni in cui sono coinvolte alte velocità del fluido. Lo scopo di tali modelli è quello di rappresentare gli effetti della miscelazione turbolenta dei fluidi in maniera discreta.
- **Validazione e verifica:** effettuate le simulazioni CFD, è necessario visualizzare e analizzare i risultati attraverso software di post-processing, data la mole di dati generati dal calcolatore. Successivamente i risultati devono essere verificati e validati, confrontandoli con dati sperimentali o soluzioni note da letteratura, altrimenti si potrebbe giungere involontariamente a conclusioni non veritiere. Questo è cruciale per garantire l'affidabilità delle simulazioni.
- **Implementazione e affinamento:** se i dati sono risultati verosimili, si può passare all'analisi delle caratteristiche fisiche che sono oggetto di studio, ipotizzarne una modifica progettuale e ripartire dalla discretizzazione del nuovo problema.

2.2 Equazioni d'interesse

Le equazioni di Navier-Stokes [12–14] costituiscono un sistema di tre equazioni di bilancio, espresse tramite derivate parziali, che permettono di prevedere il comportamento di un flusso, dal punto di vista cinematico e termodinamico. Rispetto alle equazioni di bilancio di Eulero, consentono di avere una precisione maggiore nel calcolo delle grandezze fisiche, a discapito di una semplicità di soluzione. A meno di ipotesi molto semplificative, ottenere una soluzione analitica esatta richiederebbe delle potenze e dei tempi di calcolo molto elevati, perciò nei casi più generali bisognerà accontentarsi di trovare una soluzione approssimata, utilizzando modelli matematici e un calcolatore sufficientemente potente.

Oltre alle equazioni di bilancio, inoltre, sarà necessario utilizzare le condizioni al contorno, cioè le condizioni del fluido all'inizio del fenomeno oggetto di studio.

La soluzione (esatta o approssimata) fornirà il campo delle velocità del fluido, grazie al quale è poi possibile risalire alle grandezze collegate ad essa.

I modelli matematici da poter utilizzare per approssimare la soluzione di un problema fluidodinamico prevedono alcune ipotesi semplificative. Si suppone che il fluido sia: continuo (in modo tale che si possa far tendere a zero il volume di fluido senza che si perda materia al suo interno), chimicamente omogeneo e non reagente (affinché possano essere trascurate le perturbazioni di natura chimica) e privo di cariche elettriche (per poter trascurare le reazioni ad eventuali campi elettromagnetici).

Poiché ogni particella di fluido possiede caratteristiche fisiche che dipendono dalla posizione nello spazio e dal tempo, si può scegliere tra due tipi di descrizioni del fenomeno.

La prima descrizione (detto Lagrangiana) segue la traiettoria di una singola particella di fluido e osserva le variazioni delle sue caratteristiche fisiche nel tempo. Per questo motivo, nelle equazioni di Navier-Stokes scritte in forma Lagrangiana si ritrovano le variabili di stato locali (temperatura, densità, velocità) derivate rispetto al tempo.

La seconda descrizione (detta Euleriana) considera, invece, le variazioni delle proprietà fisiche del fluido in un punto fissato, che rimane invariato per tutta la durata del caso di studio. Ciò significa che nelle equazioni ci saranno variabili che dipendono esclusivamente dalle coordinate spaziali e dal tempo.

Le equazioni di Navier-Stokes sono:

- **equazione di bilancio della massa:** esprime il principio di conserva-

zione della massa per un fluido in un sistema di riferimento inerziale. In altre parole, l'equazione afferma che la massa del fluido all'interno di un volume di controllo rimane costante nel tempo, a meno che non ci sia una sorgente o una perdita di massa all'interno del volume stesso.

Utilizzando la descrizione lagrangiana:

La massa contenuta in un volume deformabile che si muove con il fluido resta invariata nel tempo.

cioè, analiticamente:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (9)$$

Utilizzando, invece, la descrizione euleriana:

La variazione della massa contenuta in un volume fisso (rispetto al movimento del fluido) è pari alla differenza tra il flusso di massa entrante e quello uscente.

cioè, analiticamente:

$$\Phi = \left(\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} \right) dx dy dz = [\nabla \cdot (\rho \vec{u})] dx dy dz \quad (10)$$

- **equazione di bilancio della quantità di moto:**

Utilizzando la descrizione lagrangiana:

La variazione temporale della quantità di moto di un sistema è pari alla risultante delle forze esterne che agiscono sul sistema

cioè, analiticamente:

$$\frac{d\vec{Q}}{dt} = \vec{F}_e \quad (11)$$

Utilizzando, invece, la descrizione euleriana:

In un volume di controllo in cui è presente un fluido, la somma della variazione nel tempo della quantità di moto e del flusso netto di quantità di moto attraverso le superfici di ingresso e uscita del fluido eguagliano la risultante delle forze esterne agenti sul fluido contenuto nel volume di controllo.

cioè, analiticamente:

$$\int_V \rho \frac{d\vec{u}}{dt} dV = \int_S \vec{F}_S dS + \int_V \rho \vec{F}_V dV \quad (12)$$

- **equazione di bilancio dell'energia:** più propriamente nota come primo principio della termodinamica, l'equazione afferma che la variazione nel tempo dell'energia del fluido in un dato volume di controllo sommata al flusso di energia che attraversa le superfici del volume di controllo uguaglia la potenza delle forze agenti sull'elemento di fluido sommata alla variazione di energia termica del fluido.

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \left(e + \frac{v^2}{2} \right) + \rho \vec{v} \cdot \nabla \left(e + \frac{v^2}{2} \right) = -\nabla \cdot (p\vec{v}) + p\dot{q} + \rho(\vec{f} \cdot \vec{v}) \quad (13)$$

Dove e e \dot{q} rappresentano rispettivamente l'energia interna e il flusso di calore valutati per unità di massa.

- **equazioni di stato dei fluidi**

Tuttavia, per fluidi in movimento a basse velocità (cioè per numeri di Mach sufficientemente bassi, in cui i fluidi si considerano stazionari e incomprimibili), le equazioni si possono semplificare notevolmente, poiché la densità del fluido sarà ipotizzata costante. In questa trattazione si utilizzerà tale semplificazione.

2.3 Problema di chiusura delle equazioni di Navier-Stokes e utilizzo delle RANS

Come introdotto nel precedente capitolo, l'utilizzo delle equazioni di Navier-Stokes al posto delle equazioni euleriane porta ad un notevole aumento della difficoltà di risoluzione del sistema di equazioni. Inoltre, essendo i parametri variabili nello spazio, dipendenti dal tempo ed essendoci una natura aleatoria della turbolenza, è stato necessario sviluppare approcci statistici per analizzare gli effetti medi del flusso di fluido.

Invece di risolvere tutte le scale di turbolenza nel flusso (cosa che richiederebbe una risoluzione computazionale molto elevata), per semplificare la risoluzione delle equazioni, è possibile applicare la decomposizione di Reynolds alle grandezze fisiche presenti nelle equazioni di Navier-Stokes. Quest'ultima è un modo di scomporre un flusso turbolento in due componenti principali: il moto medio (o moto macroscopico) e le fluttuazioni turbolente (o moto microscopico), semplificando di molto l'analisi dei flussi turbolenti:

$$u = \bar{u} + u' \tag{14}$$

dove:

- u è la velocità totale del flusso
- \bar{u} è la velocità media del flusso
- u' sono le fluttuazioni del flusso

La decomposizione secondo Reynolds è utile perché il flusso medio può essere calcolato in modo più semplice e stabile rispetto al flusso completamente turbolento, ma porta con sé lo svantaggio di lavorare con un numero di incognite superiore.

Tale decomposizione presenta diverse proprietà, e in particolare quando essa viene applicata al prodotto di componenti medie e fluttuanti risulta che:

- la media di una componente fluttuante è nulla
- la media del prodotto di una componente media e di una fluttuante è nulla
- la media del prodotto di 2 componenti fluttuanti è diversa da zero

In particolare quest'ultima proprietà del processo di media applicata alle equazioni della conservazione della quantità di moto e dell'energia porta all'emergere di componenti che non possono essere determinate analiticamente, ma che

richiedono una trattazione modellistica.

Applicando la decomposizione di Reynolds alle grandezze che compaiono nelle equazioni di Navier-Stokes, si avrà un sistema di 5 equazioni in 11 incognite, poiché per ogni termine si avrà:

- **componente media** (media temporale): rappresenta il comportamento medio del flusso nel tempo e viene risolta attraverso le equazioni RANS.
- **componente fluttuante** (turbolenta): rappresenta la turbolenza e verrà modellata attraverso l'introduzione di modelli matematici per rendere risolvibile il sistema di equazioni.

Quindi le equazioni di Navier-Stokes riscritte in forma mediata, spesso indicate come equazioni di Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) [15], rappresentano grandezze fluidodinamiche mediate su un certo intervallo temporale, scelto in modo da essere sufficientemente piccolo rispetto ai fenomeni che si desidera studiare, ma sufficientemente grande rispetto alle fluttuazioni turbolente che si verificano nel fluido.

Per molte applicazioni pratiche, la sola conoscenza delle grandezze medie del flusso può essere sufficiente per la soluzione del problema, in particolare nell'analisi di sistemi in cui è più importante avere una comprensione approfondita delle prestazioni medie del sistema, piuttosto che delle variazioni istantanee o con durata trascurabile.

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 e, di conseguenza una riduzione delle risorse finanziarie da destinare a calcolatori estremamente potenti.

2.4 Modelli matematici

I modelli matematici forniscono delle relazioni tra le variazioni spaziali delle grandezze di turbolenza e i gradienti di velocità e pressione e tra i modelli di turbolenza più utilizzati per risolvere le RANS troviamo il k - ε , k - ω e lo Spalart-Allmaras, costruiti decomponendo le equazioni di Navier-Stokes nel tempo [16–18]. Grazie a questi modelli è possibile avere una valida approssimazione del fenomeno fluidodinamico che si intende studiare, sebbene ognuno di questi modelli abbia i suoi vantaggi e limiti, quindi è necessario scegliere accuratamente il modello da utilizzare in base alle specifiche condizioni di flusso, dalla sua complessità, dalle esigenze di studio e dalle risorse computazionali disponibili.

- **Modello k - ε :** è uno dei modelli di turbolenza più utilizzati ed è basato su due equazioni di trasporto separate per la cinetica dell'energia turbolenta (k) e la sua dissipazione (ε).
- **Modello k - ω :** è basato su due equazioni di trasporto, una per la cinetica dell'energia turbolenta (k) e una per la frequenza di dissipazione turbolenta (ω). È noto per essere efficace nella simulazione di flussi ad alto numero di Reynolds.
- **Modello Spalart-Allmaras:** è un modello RANS con un'equazione di trasporto per una variabile di viscosità cinematica turbolenta, noto per la sua semplicità. Nato per applicazioni aerospaziali che coinvolgono flussi di fluido delimitati da pareti, fornisce buoni risultati per strati limite soggetti a gradienti di pressione avversi.

Oltre a questi modelli matematici, ne esistono altri che risolvono direttamente le scale più piccole della turbolenza, quindi risultano essere più accurati, ma nello stesso tempo anche molto più onerosi di risorse di calcolo. Se ne elencano nel seguito i più rilevanti, ma non saranno utilizzati in questo studio.

- **Modello Large Eddy Simulation (LES):** risolve le scale più grandi della turbolenza direttamente e modella solo le scale più piccole. È adatto per simulare flussi turbolenti ad alta risoluzione in aree come l'aerodinamica avanzata e la combustione.
- **Modello Detached Eddy Simulation (DES):** è un'ibridazione tra il modello RANS e il modello LES ed è adatto per simulare flussi in transizione tra flusso laminare e turbolento.

- **Modello Scale-Adaptive Simulation (SAS):** è simile al DES ma utilizza un'equazione di trasporto per adattare la scala della simulazione alle condizioni del flusso.

2.5 Il modello $k - \omega$ SST

In questo caso di studio verrà utilizzato il modello $k - \omega$ SST, ossia un modello che combina i vantaggi del modello $k - \varepsilon$ con quelli del modello $k - \omega$, consentendo una migliore previsione della turbolenza in una vasta gamma di condizioni di flusso.

È un modello a due equazioni, cioè utilizza due equazioni di trasporto per risolvere le grandezze turbolente, analogamente ai modelli $k - \omega$ e $k - \varepsilon$, dove:

- **k**: rappresenta l'energia cinetica turbolenta nel flusso. Il modello calcola la variazione di k nel tempo e nello spazio per determinare come l'energia turbolenta si diffonde e si dissipa nel flusso.
- **ω** : rappresenta la frequenza di dissipazione turbolenta. Essa è collegata al tasso con cui l'energia turbolenta viene dissipata attraverso l'attrito viscoso nel fluido. Il modello k -omega SST tiene in considerazione anche il tasso di produzione di omega.

A differenza dei precedenti modelli, grazie all'introduzione di un fattore moltiplicativo (detto "fattore di blending"), si ricadrà in uno o nell'altro modello a seconda dei valori che tale fattore assume: in prossimità della parete (fattore di blending nullo) il modello $k - \omega$ SST si riduce al $k - \omega$, mentre lontano dalle pareti sarà possibile utilizzare il $k - \varepsilon$, passando dall'uno all'altro in maniera graduale, oltre a garantire una transizione tra flussi laminari e turbolenti in modo più accurato rispetto ad altri modelli.

Il termine "SST" nel nome (che sta per "Shear-Stress Transport") indica proprio il metodo con cui il modello gestisce il trasporto dello sforzo tangenziale di taglio (shear-stress) nella turbolenza. Questo approccio migliora la capacità del modello di gestire flussi che presentano gradienti di velocità significativi.

Questa proprietà lo rende adatto per simulare flussi complessi in cui possono verificarsi transizioni turbolente-laminari, come, ad esempio, attorno a veicoli terrestri e aeromobili, dove la turbolenza è dominante (alti numeri di Reynolds).

Tuttavia, è importante notare che il modello k -omega SST è un'approssimazione e dipende da alcune assunzioni semplificative sul comportamento della turbolenza. In alcune situazioni di flusso particolarmente complesse, potrebbero essere necessari modelli di turbolenza più avanzati o simulazioni più dettagliate per ottenere risultati accurati.

3 Ottimizzazione tramite Mesh Morphing

3.1 Strumenti software utilizzati

La società multinazionale ANSYS produce software di simulazione ingegneristica utilizzati per analizzare, progettare e testare prodotti e sistemi in vari settori, tra cui l'ingegneria meccanica, l'aerospaziale, l'automobilistica, l'elettronica e molti altri. Grazie a tali strumenti è possibile ottimizzare il design e la prestazione dei prodotti, ridurre i costi di sviluppo e migliorare la sicurezza e l'affidabilità. Nel caso di studio oggetto di questa tesi, sono stati utilizzati due dei software prodotti da Ansys, compresi nel loro pacchetto software chiamato ANSYS CFD (Computational Fluid Dynamics), e una libreria esterna, in particolare:

- **Ansys SpaceClaim:** software di modellazione 3D che offre un'ampia gamma di funzionalità di modellazione e manipolazione geometrica di geometrie CAD pre-esistenti.
- **Ansys Fluent:** uno dei software CFD più utilizzati e rinomati nel settore dell'ingegneria per la sua accuratezza e robustezza nei risultati delle simulazioni, consente di impostare e risolvere problemi di analisi fluidodinamica, simulando il comportamento dei fluidi in specifiche condizioni di progetto. Inoltre è in grado di supportare l'ottimizzazione del design assistito dalla simulazione attraverso il mesh morphing, oggetto di questo studio.
- **RBF Morph:** una libreria avviabile all'interno di Fluent che consente di apportare le modifiche tramite la tecnologia di mesh morphing.

3.2 Il modello CFD: condizioni iniziali e obiettivi di ottimizzazione

Come prima cosa è stato necessario importare la mesh del modello di motocicletta nell'ambiente di lavoro di SpaceClaim per poter verificare alcuni parametri relativi al modello.

Osservando la disposizione della moto e non avendo a disposizione le misure esatte del modello, è stato necessario creare un piano di simmetria che rendesse possibile la misurazione delle caratteristiche fisiche necessarie ad impostare la simulazione CFD. Il piano scelto è stato quello ZX e su tale piano sono state misurate le dimensioni del "case", delle ruote della motocicletta e l'interasse tra le due ruote. Poiché il file di partenza era già in formato mesh, per avere una maggiore sicurezza della veridicità della misura della misura della ruota si è preferito misurare sia il raggio sia il diametro e confrontarli: fortunatamente le due misurazioni si sono rilevate compatibili.

Lunghezza case	20 m
Larghezza case	8 m
Altezza case	8 m
Lunghezza moto	2.15 m
Altezza moto	1.35 m
Larghezza moto	0.53 m
Raggio ruote	0.3045 m
Interasse	1.4199 m

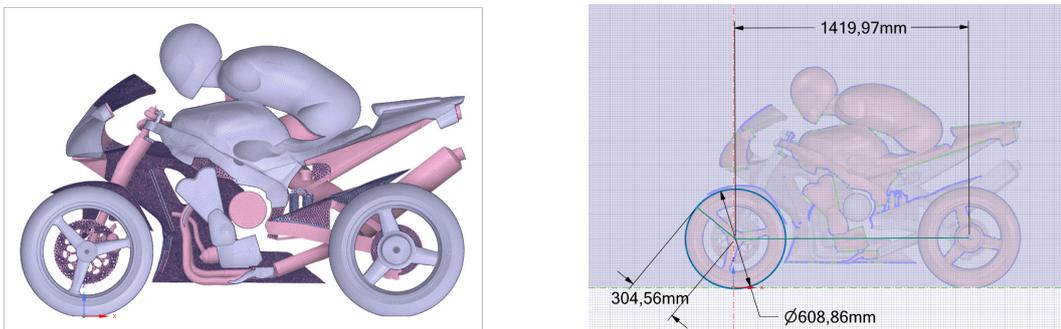


Figura 8: *Modello tridimensionale sezionato lungo il piano ZX e dimensioni della moto.*

3.3 Impostazione del modello CFD

Ottenute le misure delle ruote della motocicletta, è stato effettuato un calcolo sulla velocità di rotazione alla quale si voleva simulare il modello. Siccome l'oggetto di studio era una MotoGP si è deciso di assegnare una velocità di 200 km/h.

I dati del modello CFD saranno perciò i seguenti: Avendo definito i dati di

Velocità di simulazione	200 km/h	55.5556 m/s
Velocità angolare	$\omega = \frac{v}{r}$	182.4486 rad/s
Raggio delle ruote	304.56 mm	0.3045 m
Interasse	1419.97 mm	1.4199 m

progetto, si è potuto passare ad avviare il launcher di Fluent. Una volta avviato quest'ultimo, spostandosi nella sezione "Solution" sono stati impostate le "Dimensions" in 3D, rimossa la spunta su "Double Precision" per ridurre il carico di lavoro sul computer in uso e un numero di processori da utilizzare in parallelo ("Solver Processes") su 6, pari al numero di cores fisici posseduti dal processore in utilizzo. Si sconsiglia l'utilizzo di tecnologie di virtualizzazione dei cores fisici, poiché non ottimali ai fini della ripartizione del carico di lavoro sui singoli cores.

All'interno di Fluent è stato impostato il "Case", ossia l'insieme di parametri di setup che definiscono le condizioni di studio della simulazione. Poiché il modello presentava un gran numero di superfici separate, come prima cosa si è scelto di raggruppare tutte le superfici relative alla ruota anteriore e tutte quelle relative alla ruota posteriore, utilizzando la funzione "Combine" e poi "Merge" integrata nel menù "Domain" di Fluent. Questo faciliterà l'impostazione di alcuni parametri del modello. Il setup prevede la definizione di:

- **Models:** quali modelli matematici si vogliono utilizzare, in questo caso si è lasciato su Off tutti i modelli ad eccezione di quello viscoso ("Viscous"), impostandolo su k-omega SST.
- **Materials:** è importante selezionare l'aria per il fluido, meno importante la specifica del solido, poiché stiamo impostando un modello fluidodinamico in assenza di scambi termici, perciò la scelta dei materiali è ininfluente.
- **Cell Zone Conditions:** è stato lasciato inalterato il modello di fluido impostato nella mesh.

- **Boundary Conditions:**

- **Inlet:** superficie di ingresso del fluido, impostata come "Velocity Inlet", assegnando una velocità di ingresso dell'aria di 55.5556 m/s.
- **Internal:** volume interno della mesh, si è lasciato "interior-1" come da impostazione della mesh.
- **Outlet:** superficie di uscita del fluido, impostata come "Pressure Outlet", assegnando una pressione relativa di uscita dell'aria pari a 0 Pa, poiché così la pressione in uscita risulterà pari a quella ambientale.
- **Wall:**
 - * **Translational Wall:** superfici che traslano, ossia l'asfalto, assegnando una velocità di 55.5556 m/s in direzione X .
 - * **Rotational Wall:** superfici in rotazione, cioè le due ruote e i relativi componenti vincolati ad esse, come dischi dei freni, corona della trasmissione e cuscinetti delle ruote; la velocità di rotazione è stata fissata a 182.4486 rad/s per entrambe le ruote, con l'unica distinzione relativa all'origine dell'asse di rotazione per rispettare il differente asse tra ruota anteriore e posteriore. Questa operazione è stata fatta aggiungendo l'interasse nella coordinata X della ruota posteriore.
 - * **Stationary Wall:** superfici non in movimento, in particolare la superficie superiore della mesh, le superfici laterali (sinistra e destra) e tutte le superfici della moto e del pilota, ad eccezione dei gruppi ruota.

- **Reference Values:** sono state specificate le caratteristiche del modello, in particolare è stata modificata l'area frontale della moto, utilizzando una funzione compresa in Fluent ("Projected Areas"), che consente di selezionare le superfici di interesse e proiettarle su un piano. In questo caso si sono selezionate tutte le superfici della moto e del pilota e sono state proiettate sul piano con normale X , ossia la superficie da cui proviene il flusso d'aria.

Il totale dei nodi della mesh è stato di 5789966, che hanno richiesto una quantità di RAM di circa 19 gb.

Prima di passare alla specifica delle grandezze che la simulazione calcolerà, si è scelto di utilizzare una funzione di Fluent chiamata "Improve Mesh Quality",

apportando una modifica automatizzata di 10 iterazioni sullo 0.5% delle celle che il software rilevava avere la qualità più bassa. Questo passaggio è necessario per ottenere una simulazione realistica e per non avere problemi di convergenza delle soluzioni.

A questo punto si è passati al setup delle grandezze d'interesse per questo studio, ossia il coefficiente di drag e il coefficiente di lift.

Sono state, quindi, aggiunte tra le "Report Definitions" due report:

- **Drag Coefficient:** applicato a tutte le superfici della moto e del pilota lungo la direzione X del modello.
- **Lift Coefficient:** anch'esso per tutte le superfici della moto e del pilota, ma lungo la direzione Z del modello.

A questo punto il "Case" è stato impostato e si può procedere all'inizializzazione del modello, utilizzando il comando "Initialization", selezionando il tipo "Standard Initialization" e facendo riferimento ai valori di "Inlet" nella scheda "Compute from".

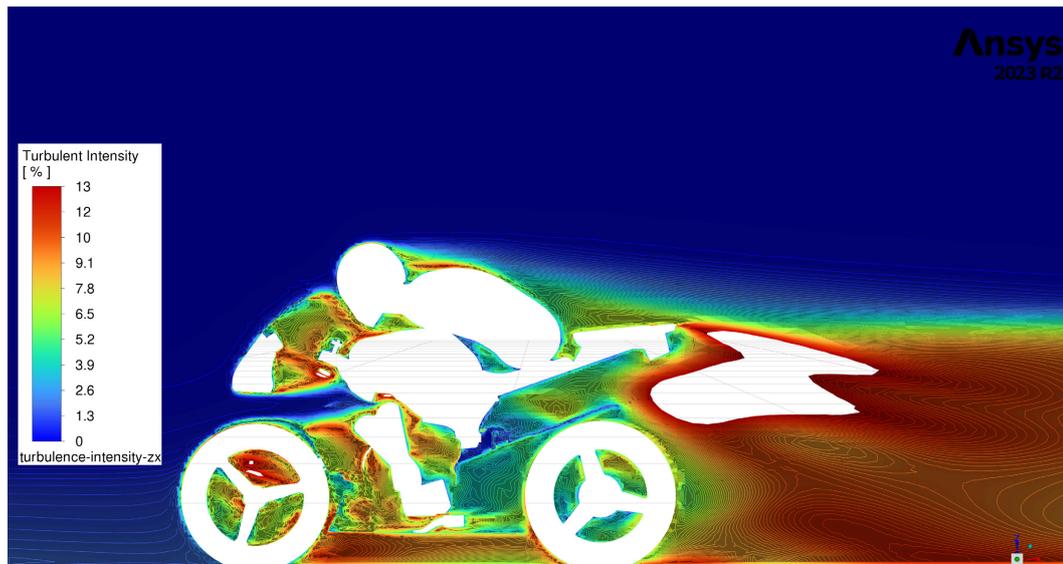
Finalizzata l'inizializzazione, l'ultimo passaggio è quello di impostare nella scheda "Run Calculation" il numero di iterazioni desiderate. In questo caso si è scelto di optare per un numero sufficientemente elevato da garantire una certa convergenza dei risultati, ma non eccessivo poiché avrebbe richiesto tempi di calcolo eccessivamente lunghi, senza, probabilmente, migliorare sensibilmente la convergenza della soluzione: il valore scelto è stato di 600 iterazioni.

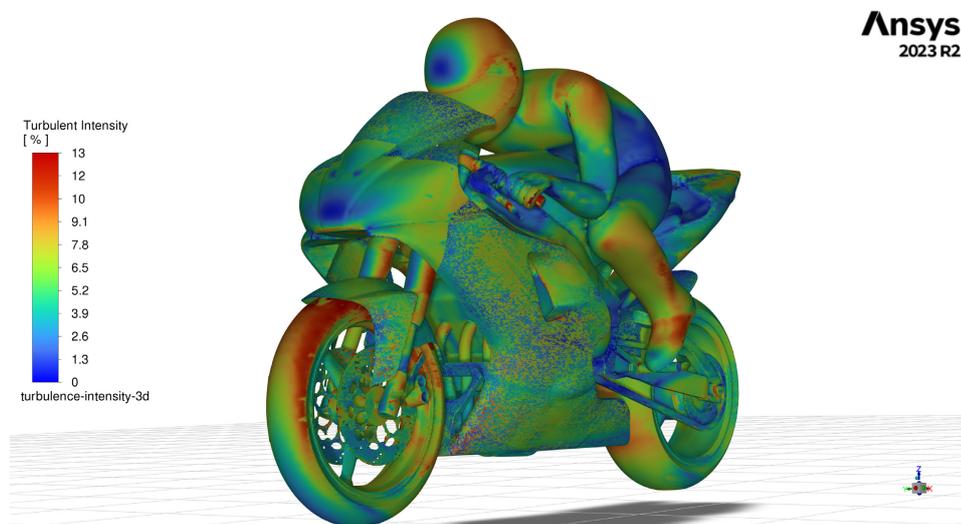
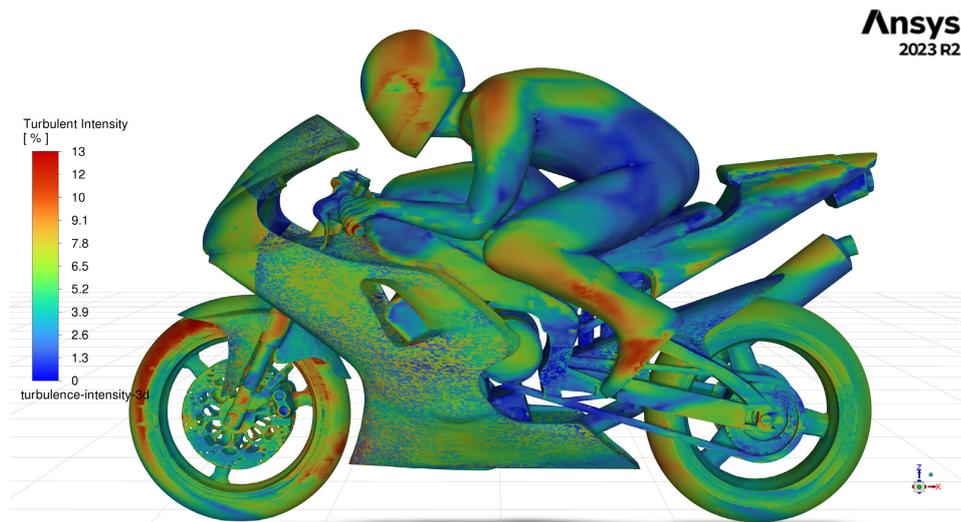
3.4 Validazione del modello e obiettivi di ottimizzazione

Una volta concluse le iterazioni prescritte, i valori restituiti (approssimati alla quarta cifra decimale) e calcolati su tutte le superfici della moto e del pilota sono stati:

Coefficiente di drag C_d	0.4901
Coefficiente di lift C_l	0.0861
Forza di drag F_d [N]	487.2254
Forza di lift F_l [N]	85.5130

Inoltre si è scelto di generare attraverso dei "Contour" l'andamento della turbolenza attorno alla motocicletta e al pilota, sia su un piano di sezionamento dell'oggetto (ZX) sia tridimensionalmente, con una scala che va da 0% a 13% di turbolenza, per evidenziare le aree in cui è maggiore.





Dai contour appare evidente che le zone in cui la turbolenza è maggiore risultano essere prevalentemente:

- tra casco e schiena del pilota.
- frontale della carenatura.
- sotto la carenatura.
- al termine del codino.

Poiché la turbolenza influisce negativamente sia sul drag che sul lift della moto, gli obiettivi dell'ottimizzazione riguarderanno questi punti in cui la turbolenza è elevata, e il workflow seguirà l'andamento del flusso d'aria, cioè si inizierà dalle superfici frontali per poi spostarsi verso il posteriore del veicolo.

Sebbene quest'ordine non sia influente se si modifica un solo componente alla volta, risulta fondamentale se si vuole ottenere un'ottimizzazione data da più contributi simultaneamente, poiché le superfici frontali influenzano il

flusso d'aria prima che possa arrivare nella zona centrale o posteriore della motocicletta.

Di seguito si riportano le schermate relative alle iterazioni del coefficiente di drag e di lift, sia in scala globale che limitando il range in un intervallo di valori interessante.

La fluttuazione dei valori non è un fattore discriminante poiché è inevitabile ci sia ed è relativamente contenuta, perciò è possibile fare la media degli ultimi valori senza eccessiva perdita di accuratezza.

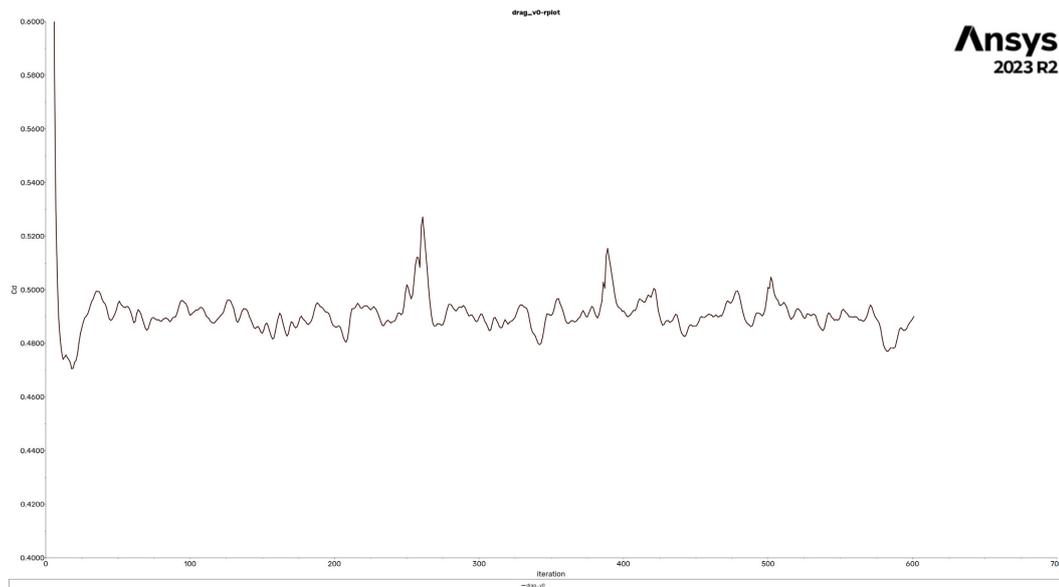


Figura 9: Andamento del coefficiente di drag C_d nel modello iniziale.

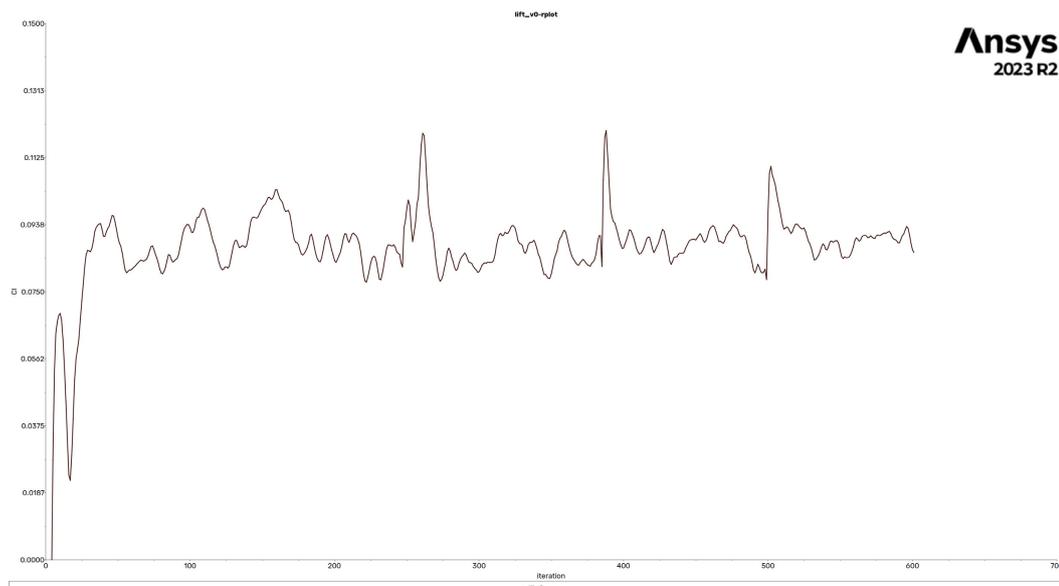


Figura 10: Andamento del coefficiente di lift C_l nel modello iniziale.

3.5 RBF Morph e il Mesh Morphing

Il mesh morphing (o deformazione della griglia) è una tecnica utilizzata nell'ambito delle simulazioni di fluidodinamica computazionale e in altre applicazioni di analisi numerica per modificare la geometria di una griglia di calcolo (o "mesh") e adattarla a cambiamenti nella geometria senza ricorrere al rifacimento di un nuovo modello CAD e alla relativa mesh aggiornata. Questa recente tecnologia nasce dall'esigenza di ridurre i tempi necessari a confrontare modelli CFD prima e dopo aver effettuato le ottimizzazioni.

Grazie al mesh morphing sono possibili anche ulteriori ottimizzazioni, come l'adattamento alla deformazione della geometria di un oggetto che cambia durante il tempo (ad esempio a causa di flessioni strutturali o deformazioni), evitando la necessità di creare griglie diverse per ciascuna fase della simulazione, oppure per simulare il cambiamento degli strati limite durante il volo di aeromobili, al fine di migliorarne l'efficienza.

In particolare, il mesh morphing utilizza algoritmi matematici per modificare la posizione dei nodi (detti anche vertici) della griglia in modo coerente con i cambiamenti della geometria o delle condizioni del flusso di fluido. Questo processo richiede un calcolo computazionale intensivo, ma consente di ottenere simulazioni più accurate e dettagliate in situazioni complesse.

Nel presente caso di studio il mesh morphing verrà utilizzato per modificare la geometria della motocicletta al fine di migliorarne le prestazioni aerodinamiche, influenzando il comportamento dell'aria attorno ad essa, e tali modifiche saranno poi perfezionate operando prima su diverse zone dell'oggetto singolarmente, e poi sommando le singole ottimizzazioni e analizzandone gli effetti complessivi.

Per ottimizzare le zone di maggiore disturbo ai fini aerodinamici della motocicletta si utilizzerà una libreria di Fluent chiamata RBF Morph [19], un potente strumento grazie al quale è possibile applicare il mesh morphing ad una mesh costruita a fini aerodinamici.

Il workflow di tale operazione senza l'utilizzo del Mesh Morphing prevederebbe:

- Disegno del CAD dell'oggetto da studiare
- Creazione della relativa mesh
- Impostazione del modello CFD
- Avvio del calcolo relativo alle grandezze d'interesse
- Analisi dei risultati ottenuti e ipotesi di ottimizzazione
- Modifica del CAD originario

- Creazione della nuova mesh
- Avvio del nuovo calcolo relativo alle grandezze d'interesse
- Analisi dei risultati ottenuti e confronto con il modello originario

Utilizzando il mesh morphing è possibile eliminare la parte di modifica del CAD e di creazione della nuova mesh, rendendo possibile un notevole risparmio di tempo e passando direttamente alla risoluzione della nuova geometria.

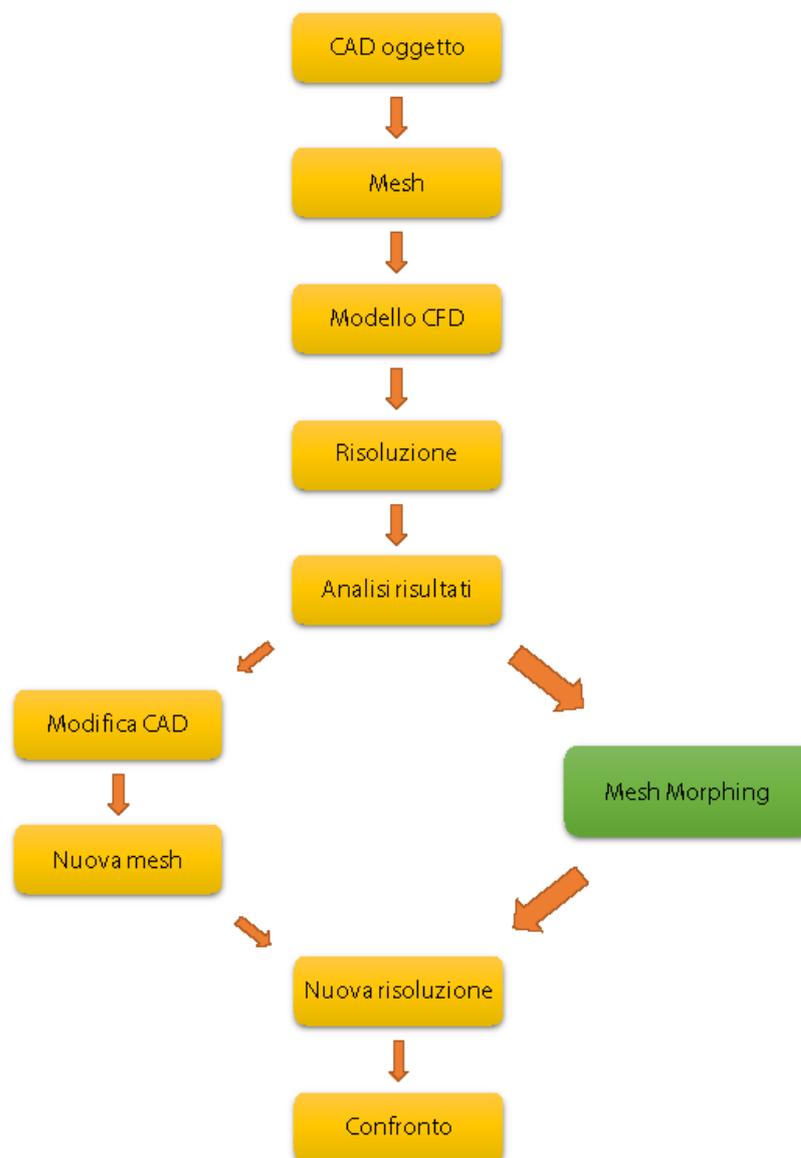


Figura 11: *Workflow per l'ottimizzazione CFD con e senza Mesh Morphing.*

Poiché quando si lavora con una mesh si fa una modellazione degli oggetti in questione, traducendoli in un insieme di punti con caratteristiche aerodinamiche pressoché analoghe, ci si distacca dalla fisica che tiene uniti gli oggetti. Perciò RBF Morph opera sfruttando il principio tramite cui è possibile modificare le posizioni relative tra punti della mesh adiacenti, senza perdere significativamente veridicità ai fini di un'analisi fluidodinamica.

Modificando una specifica nuvola di punti della mesh si può simulare l'effetto di una variazione di forma di uno o più componenti, senza dover ridisegnare un nuovo CAD degli oggetti e, quindi, dover ricostruire da zero una nuova mesh. Ovviamente tale modifica non può essere utilizzata per grandi spostamenti dei punti della mesh, oltre che per limiti costruttivi e/o regolamentari dell'oggetto, anche perché si potrebbero generare volumi negativi nella mesh, rendendola inutilizzabile ai fini di una simulazione CFD. Per evitare che questo fenomeno accada, oltre a limitare gli spostamenti relativi, è comunque necessario suddividere i punti del dominio di modifica in tre macro-gruppi:

- **Punti mobili:** punti di cui si vogliono modificare le posizioni rispetto al modello di partenza, specificando quale tipo di trasformazione si vuole apportare (ad esempio: una traslazione in una certa direzione).
- **Punti fissi:** punti che, pur rientrando nel dominio di modifica, non devono cambiare la loro posizione, ad esempio per vincoli strutturali del modello.
- **Zona di buffer:** zone di punti la cui posizione non dovrà rispettare né una modifica prestabilita, né rimanere necessariamente invariata. Il ruolo di questi punti è fondamentale affinché non si generino volumi negativi, poiché fanno da buffer, consentendo ai punti adiacenti a quelli che si spostano di risentire delle variazioni di posizione e adattarsi ad esse.

Quindi, affinché una modifica attraverso RBF Morph vada a buon fine, è necessario:

- non prescrivere trasformazioni eccessivamente differenti dalla configurazione iniziale.
- utilizzare un dominio di punti sufficientemente grande per consentire ai punti ai bordi del dominio di avere una continuità con quelli al di fuori di esso
- stabilire una zona di buffer adeguata tra i punti trasformati e quelli che non soggetti a trasformazione, in modo da garantire un'assestamento graduale

3.6 Ottimizzazione 1: abbassamento del casco

La prima modifica che si è scelto di apportare al modello non ha riguardato le superfici della moto, ma è stata quella di muovere verso il basso il casco del pilota, simulando una posizione assunta quasi esclusivamente nei rettilinei delle piste, poiché se da un lato consente di "incarenarsi" maggiormente e ridurre l'impatto che il corpo del pilota ha con l'aria, dall'altra non consente un controllo ottimale della moto. Inoltre in questa posizione il pilota può vedere più agevolmente i tempi e i dati relativi alla moto sulla strumentazione e, soprattutto, può proteggersi dalle turbolenze delle alte velocità, che altrimenti stancherebbero inutilmente i muscoli del suo collo.

La discontinuità tra il cupolino e il casco e tra il casco e la parte posteriore della tuta dove è situato il paraschiena rende quasi impossibile l'esistenza di un flusso d'aria che segua perfettamente il profilo del pilota, senza distaccarsi. Quindi per cercare di minimizzare le cause delle turbolenze risulta fondamentale perfezionare le dimensioni e la forma di casco e tuta.

In particolare sui caschi negli ultimi anni sono state aggiunte delle appendici aerodinamiche sulla parte posteriore della testa, in modo da convogliare l'aria verso la "gobba" del paraschiena.

Inoltre, anche se in maniera meno significativa rispetto all'abbassamento del casco, a volte i piloti cercano di ottimizzare anche la posizione dei piedi, in modo da dirigere il flusso d'aria verso la ruota posteriore, riducendo leggermente la resistenza complessiva.

Infine, studiare l'andamento del flusso d'aria, in particolare, nella parte posteriore della moto consente anche di ridurre la cosiddetta "scia" generata dalla moto stessa, una condizione per cui il pilota che segue ottiene un vantaggio in termini di resistenza aerodinamica dalla moto che lo precede e, quindi, di velocità massima. Questo è chiaramente un vantaggio che nessuno dei piloti vuole concedere a chi lo segue ed è particolarmente evidenziato nelle categorie minori, in cui la potenza del motore è meno influente rispetto all'aerodinamica e i piloti utilizzano tale scia per sorpassare gli avversari sui rettilinei.

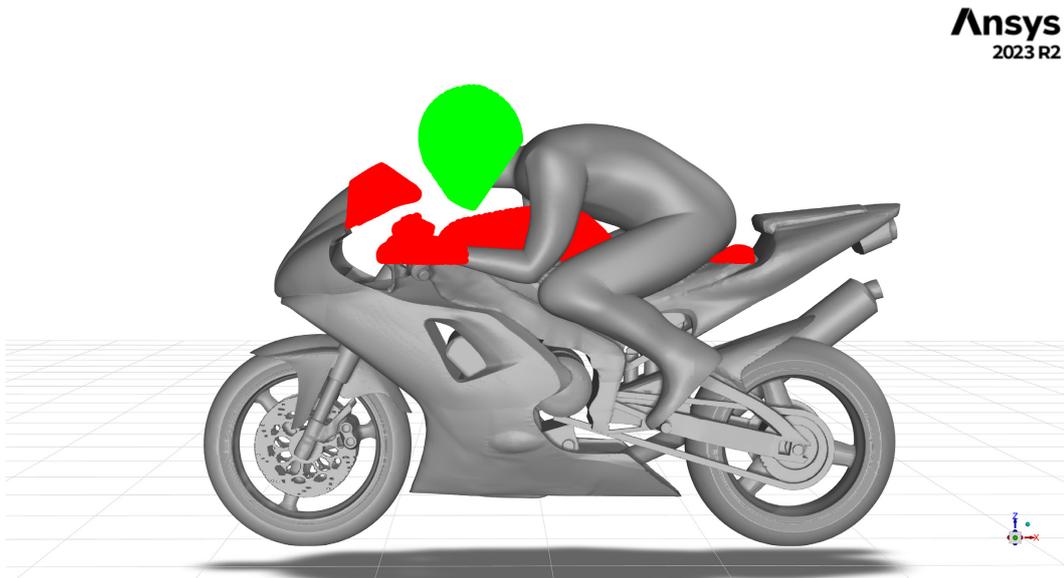
In questo studio di ottimizzazione si è scelto di simulare l'abbassamento del casco perché ritenuto il contributo più migliorativo.

Per prima cosa si è definito il dominio di punti della mesh che saranno modificati, utilizzando la funzione "Encaps" nella forma di "box". Successivamente sono state definiti due set nella sezione "Surfs", specificando quali superfici dovranno rimanere inalterate e quali, invece, saranno oggetto di modifica.

Le superfici che dovranno subire uno spostamento sono quelle del casco e del collo del pilota, per il corpo del pilota non è stato specificato nè un movimento

specifico n  un impedimento del movimento, in modo da rimanere libero di deformarsi leggermente per assecondare il lo spostamento della testa, mentre superfici come il cupolino anteriore, il serbatoio, il manubrio e la sella del pilota sono state bloccate poich  non dovranno risentire della modifica di postura del pilota. Gli spostamenti imposti al casco del pilota sono di 1 cm sia in direzione Y che in direzione Z . La decisione di utilizzare uno spostamento nelle due direzioni   stata presa per simulare pi  realisticamente il movimento della testa del pilota, mentre l'aver scelto spostamenti unitari consente di modificare il coefficiente di amplificazione prima di apportare il Mesh Morphing e ottenere spostamenti multipli di quello unitario senza dover modificare il setup delle "Surfs".

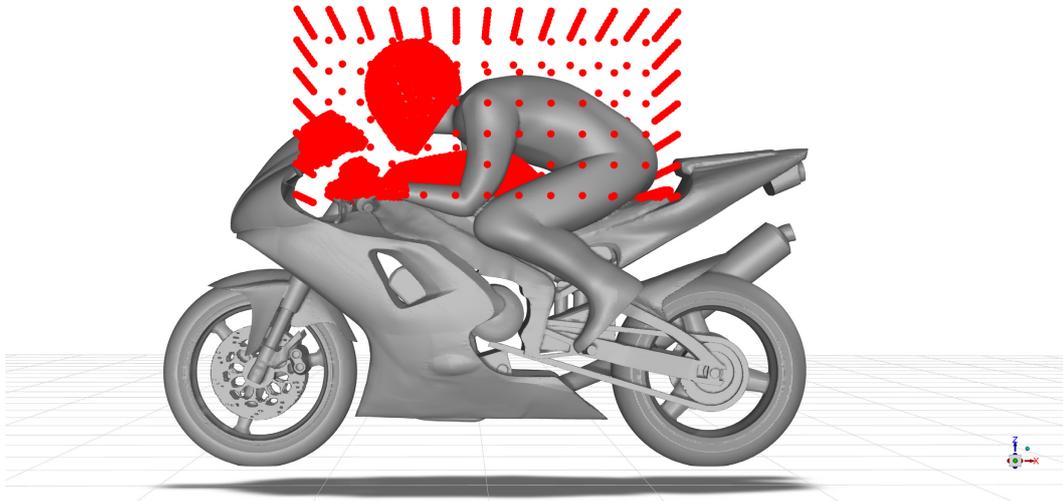
Nella figura seguente vengono rappresentate in verde le superfici che subiranno modifiche, mentre in rosso quelle vincolate a rimanere inalterate.



A questo punto   possibile passare alla funzione "Solve", nella quale vengono inseriti i parametri di affinamento delle nuvole di punti e grazie alla quale   possibile stimare preventivamente il numero di nodi che saranno modificati. Nel caso in questione si   scelto di utilizzare un "LCM Distance" di 0.014, tale da garantire un totale di 3298 punti.

Prima di procedere con l'operazione di morphing nell'omonima sezione "Morph", è stato scelto di utilizzare la funzione "Preview" per avere un'idea verosimile delle modifiche che apporterà il morphing. Da questa figura si

Ansys
2023 R2



può riconoscere sia il dominio di "Encap", sia la nuvola di punti che saranno oggetto di mesh morphing, indistintamente se si muoveranno o no.

Una volta avviata e terminata l'operazione di "Morph" con un coefficiente di amplificazione pari a 2, non sono stati generati volumi negativi, perciò la mesh risulterà modificata e verrà salvata e utilizzata per le successive analisi riguardanti il coefficiente di drag e di lift.

A questo punto sono state inizializzate e avviate le iterazioni riguardanti il calcolo del coefficiente di drag e di lift e, una volta terminati, i risultati sono stati:

	Iniziale	Ottimizzazione 1	Incremento
Coefficiente di drag C_d	0.4900	0.4974	+1.48%
Coefficiente di lift C_l	0.0860	0.0807	-6.16%
Forza di drag F_d [N]	487.2254	489.7514	+2.5259 N
Forza di lift F_l [N]	85.5130	79.4750	-6.0379 N

Inoltre, per evidenziare le conseguenze del morphing, è stato costruito un piano di sezionamento (in questo caso il piano ZX), per graficare l'andamento della turbolenza (detto "contour") in una scala da 0% a 13% su tale piano e un contour tridimensionale, da cui si può vedere l'influenza del mesh morphing sulle superfici della moto e del pilota.



Figura 12: *Contour delle turbolenze nel modello iniziale.*



Figura 13: *Contour delle turbolenze del modello modificato con la prima ottimizzazione.*

Dal confronto tra le due immagini si può notare come le turbolenze nella zona posteriore del casco siano diminuite leggermente, come ci si poteva aspettare da uno spostamento di solo 2 cm del casco, mentre sono lievemente aumentate nella zona compresa tra la parte bassa del casco e il serbatoio della moto.

Infine, nella zona posteriore della moto c'è stato un contributo più significativo nella turbolenza, che si è ridotta notevolmente. Le zone in cui il contour è vuoto rappresentano o zone in cui è presente un componente della motocicletta o del pilota, o zone in cui la turbolenza va oltre il valore massimo di 13%, poiché è stato abilitato il "Clip to Range" tra le opzioni di visualizzazione dei contour. Perciò il fatto che l'area non colorata si sia ridotta indica un abbassamento della turbolenza in quei punti.

Di seguito si riportano le schermate relative alle iterazioni del coefficiente di drag e di lift, limitando il range in un intervallo di valori interessante. La fluttuazione dei valori non è un fattore discriminante poiché è inevitabile ci sia ed è relativamente contenuta, perciò è possibile fare la media degli ultimi valori senza eccessiva perdita di accuratezza.

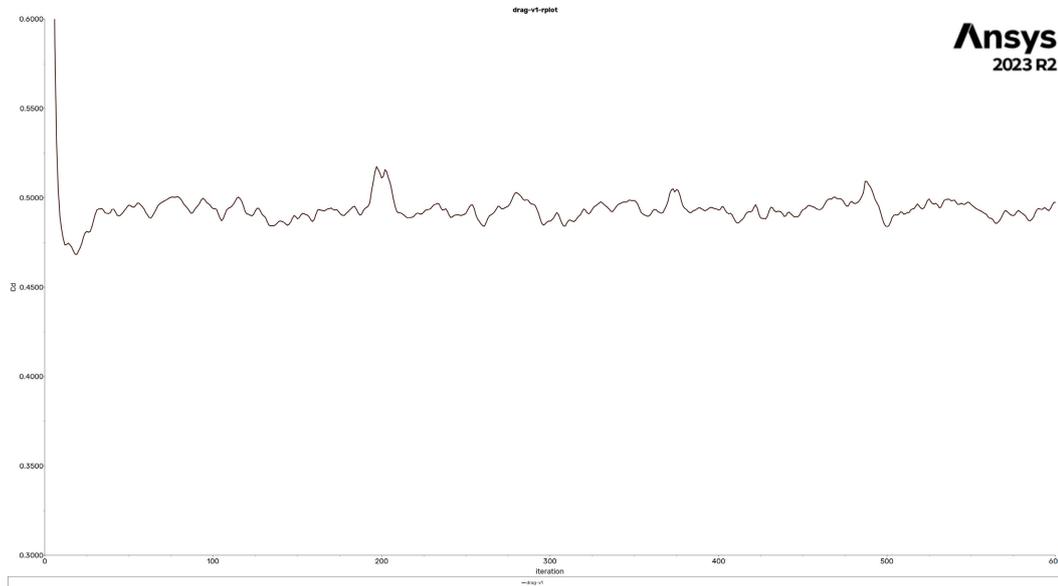


Figura 14: *Andamento del coefficiente di drag C_d nel modello 1.*

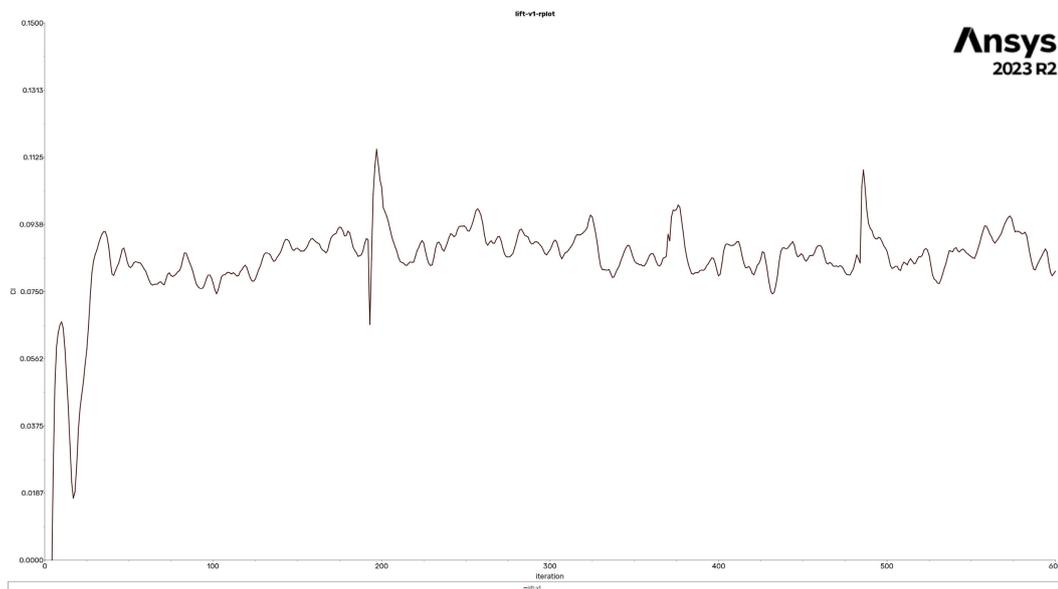


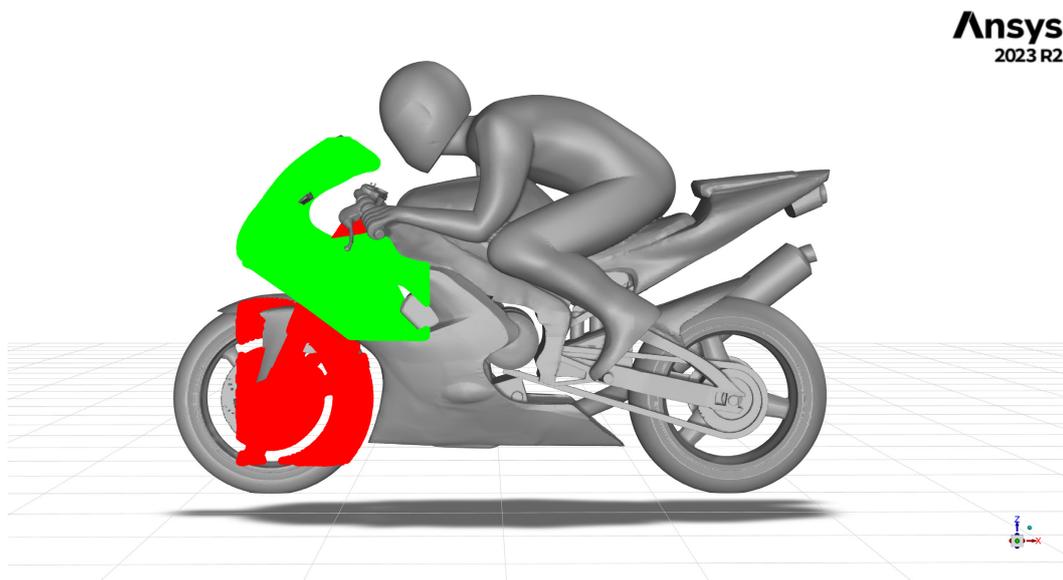
Figura 15: *Andamento del coefficiente di lift C_l nel modello 1.*

3.7 Ottimizzazione 2: ridimensionamento carenatura

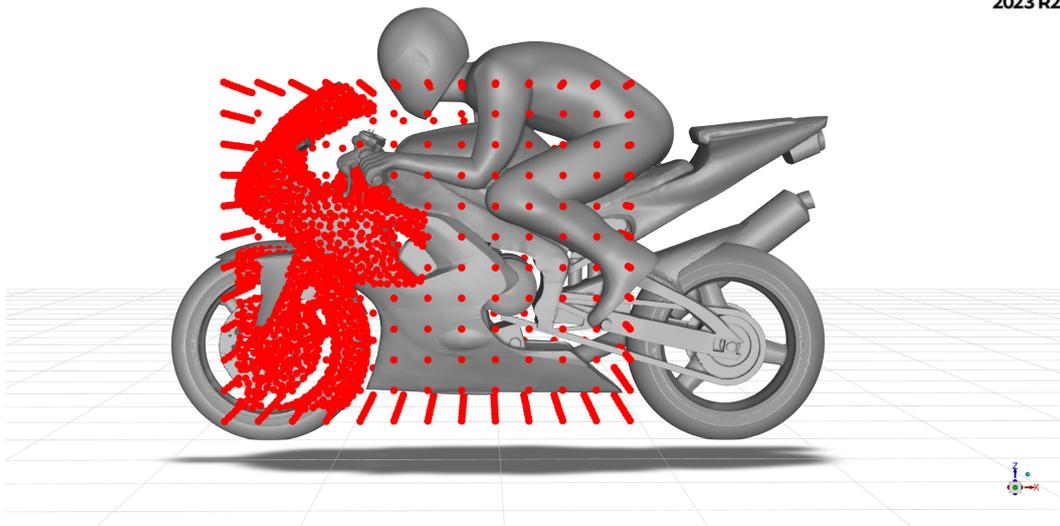
La seconda modifica che è stata effettuata al modello di partenza ha riguardato la parte frontale della carenatura, in particolare la zona attorno al cupolino, che copre il manubrio e le mani del pilota. Infatti, poiché si è notato che c'era una forte concentrazione di turbolenza in quella zona, si è provato a modificare la larghezza della carena lungo la direzione Y , applicando un fattore di scala in tale direzione.

Per prima cosa si è definito il dominio di punti della mesh che saranno modificati, utilizzando la funzione "Encaps" nella forma di "box". Successivamente sono state definiti due set nella sezione "Surfs", specificando quali superfici dovranno rimanere inalterate e quali, invece, saranno oggetto di modifica. Le superfici che subiranno una modifica saranno alterate utilizzando il comando "Scale" di RBF Morph di un fattore 1.1 in direzione Y , cioè subiranno una variazione del 10% in tale direzione, e il risultato finale dipenderà dal fattore di amplificazione scelto nella sezione "Morph", mentre quelle che non devono essere influenzate dal morphing verranno impostate a spostamento nullo.

Nella figura le superfici in verde sono quelle che subiranno modifiche, mentre in rosso quelle vincolate a rimanere inalterate.



A questo punto è possibile passare alla funzione "Solve", nella quale vengono inseriti i parametri di affinamento delle nuvole di punti e grazie alla quale è possibile stimare preventivamente il numero di nodi che saranno modificati. Nel caso in questione si è scelto di utilizzare un "LCM Distance" di 0.02, tale da garantire un totale di 3300 punti. Dalla seguente figura si può riconoscere sia il dominio di "Encap", sia la nuvola di punti che saranno oggetto di mesh morphing, indistintamente se si muoveranno o no.



Prima di procedere con l'operazione di morphing nell'omonima sezione "Morph", è stato scelto di utilizzare la funzione "Preview" per avere un'idea verosimile delle modifiche che apporterà il morphing.

Una volta avviata e terminata l'operazione di "Morph" con un coefficiente di amplificazione pari a 2, non sono stati generati volumi negativi, perciò la mesh risulterà modificata e verrà salvata e utilizzata per le successive analisi riguardanti il coefficiente di drag e di lift.

A questo punto sono state inizializzate e avviate le iterazioni riguardanti il calcolo del coefficiente di drag e di lift e, una volta terminati, i risultati sono stati:

	Iniziale	Ottimizzazione 2.1	Incremento
Coefficiente di drag C_d	0.4900	0.5147	+5.0408%
Coefficiente di lift C_l	0.0860	0.0684	-20.4651%
Forza di drag F_d [N]	487.2254	509.4250	+22.1995 N
Forza di lift F_l [N]	85.5130	67.6989	-17.8140 N

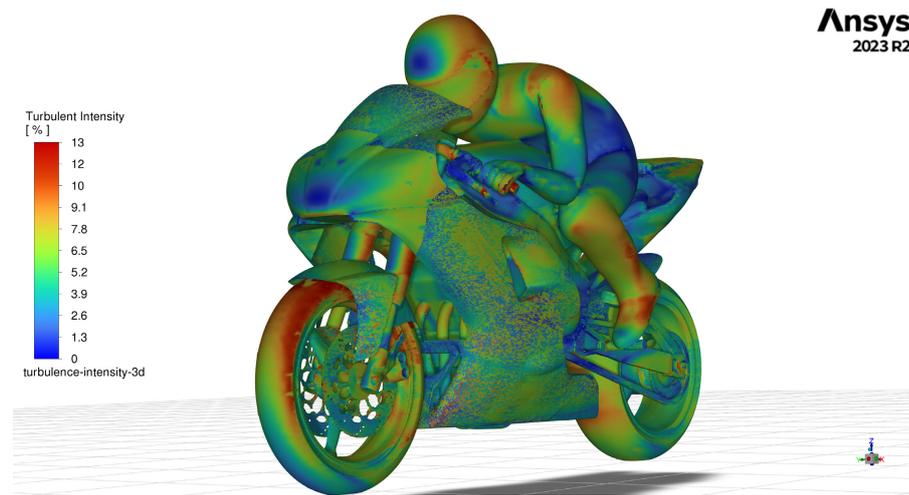


Figura 16: *Contour tridimensionale delle turbolenze nel modello iniziale.*

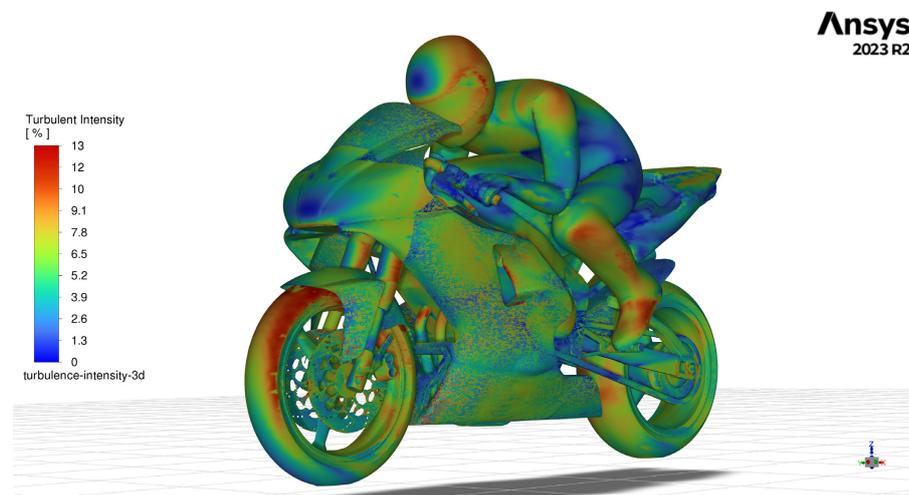


Figura 17: *Contour tridimensionale delle turbolenze del modello modificato con l'ottimizzazione 2.1.*

Dal confronto tra i contour si può notare come l'allargamento della carenatura abbia ridotto le turbolenze nella parte del manubrio, delle spalle del pilota, aumentandola attorno agli stivali. Questo è un risultato che ci si poteva aspettare poiché la carena più larga solo nella parte più alta funge da scudo per le parti del pilota che si trovano dall'altezza del serbatoio in sù, mentre per proteggere anche gli stivali sarebbe stato necessario estendere la zona di modifica a tutta la carenatura.

Tuttavia si è scelto di non apportare questa modifica poiché influenzerebbe un numero troppo elevato di punti della mesh e sarebbe troppo invadente ai fini dei calcoli aerodinamici, rendendo più difficile valutarne gli eventuali benefici e svantaggi.

Di seguito si riportano le schermate relative alle iterazioni del coefficiente di drag e di lift, limitando il range in un intervallo di valori interessante. La fluttuazione dei valori non è un fattore discriminante poiché è inevitabile ci sia ed è relativamente contenuta, perciò è possibile fare la media degli ultimi valori senza eccessiva perdita di accuratezza.

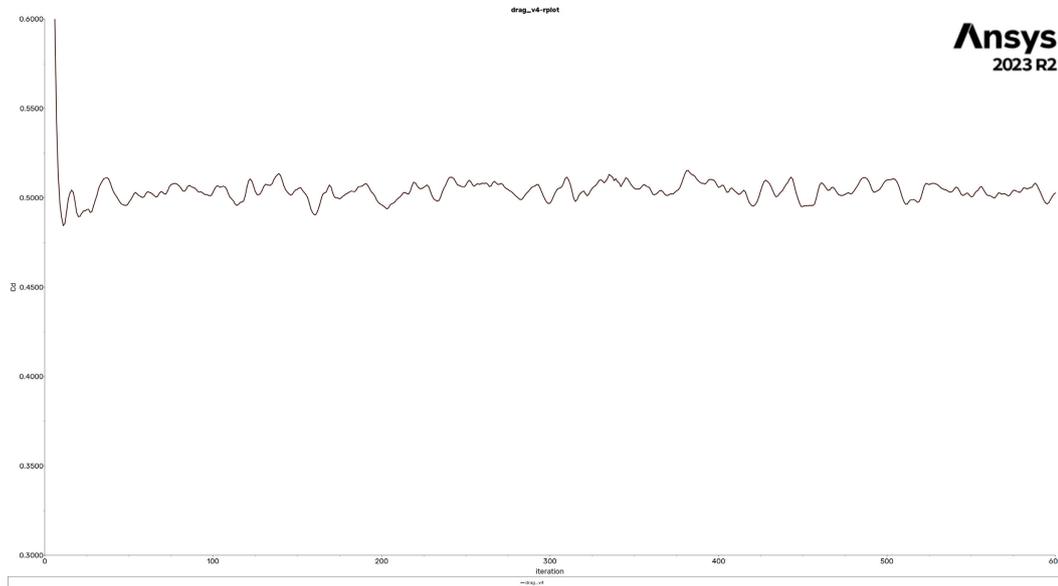


Figura 18: *Andamento del coefficiente di drag C_d nel modello 2.1.*

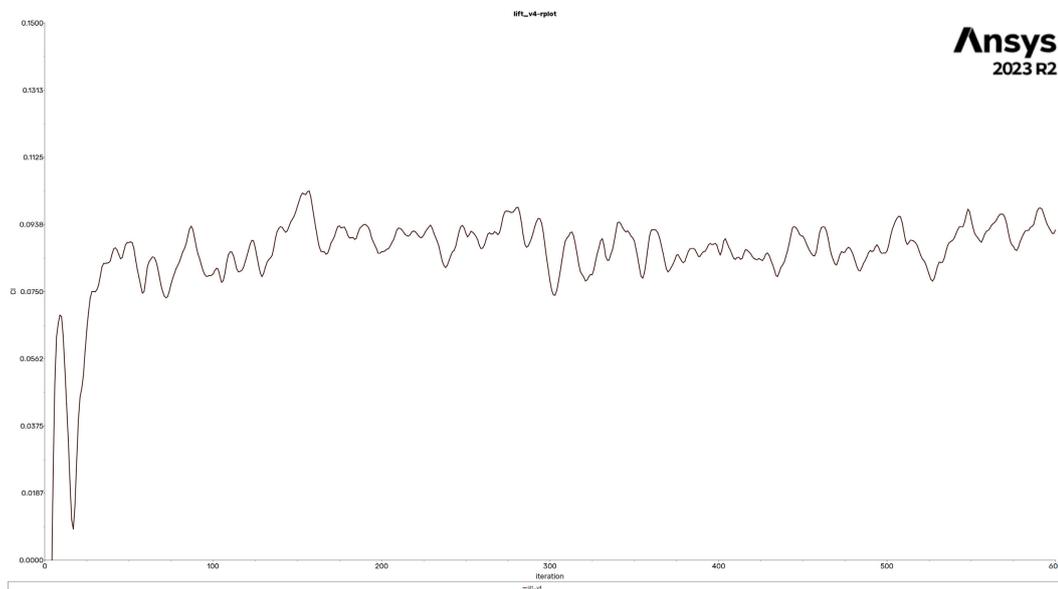


Figura 19: *Andamento del coefficiente di lift C_l nel modello 2.1.*

Mantenendo inalterato il setup di RBF Morph è stata fatta una modifica analoga alla precedente, invertendo il parametro di scala in direzione Y , cioè passando da 1.1 a 0.9, cioè restringendo la carenatura anziché allargarla.

Il risultato in termini dei coefficienti di drag e lift è stato il seguente:

	Iniziale	Ottimizzazione 2.2	Incremento
Coefficiente di drag C_d	0.4900	0.4717	-3.7346%
Coefficiente di lift C_l	0.0860	0.1053	22.4418%
Forza di drag F_d [N]	487.2254	467.2327	-19.9927 N
Forza di lift F_l [N]	85.5130	104.3027	-18.7896 N

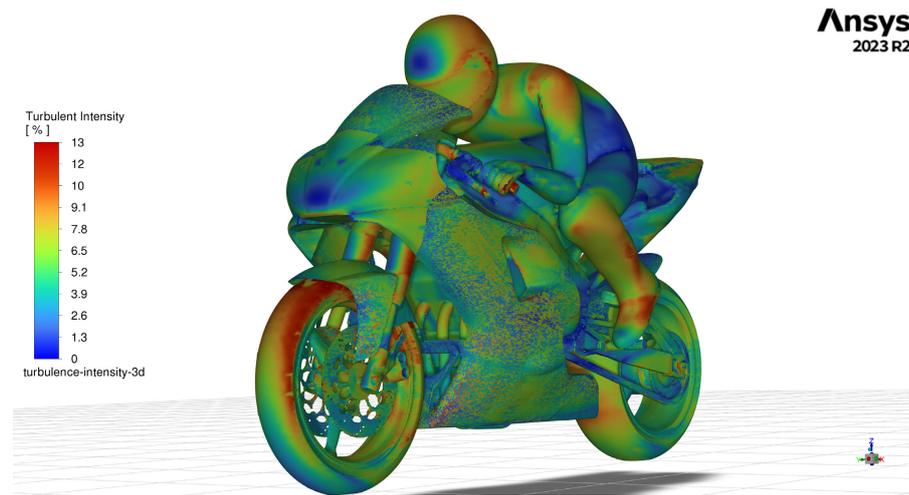


Figura 20: *Contour tridimensionale delle turbolenze nel modello iniziale.*

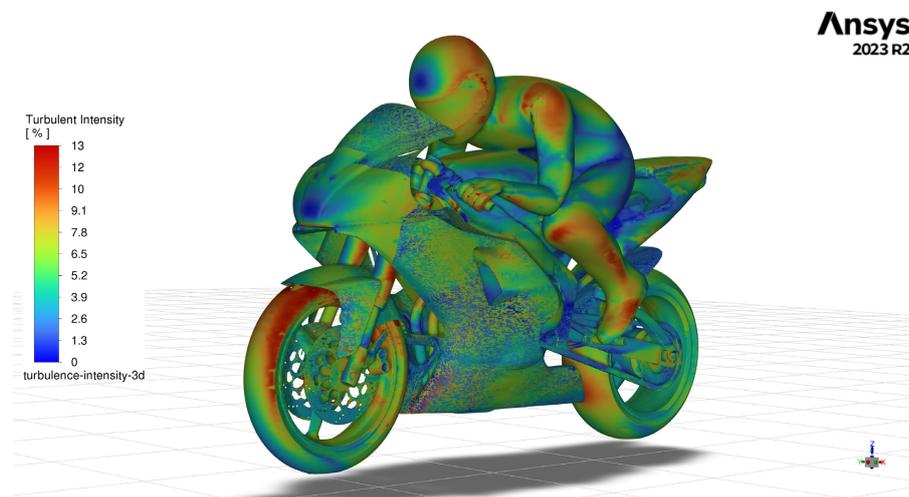


Figura 21: *Contour tridimensionale delle turbolenze del modello modificato con l'ottimizzazione 2.2.*

Dal confronto tra i contour si può notare come il restringimento della carenatura abbia aumentato le turbolenze attorno agli stivali, ma sono sostanzialmente invariate nella zona delle mani e delle spalle del pilota. Questo è un risultato che parzialmente ci si poteva aspettare, poiché la carena più stretta protegge complessivamente meno, mentre può sembrare insolito il contributo pressoché nullo nella parte superiore del corpo del pilota.

Questo si può spiegare considerando che le modifiche apportate alla carena anteriore influiscono anche sulle altre componenti della moto e, quindi, non è detto che due modifiche opposte tra loro (come nel caso di allargamento e restringimento della carena anteriore) portino risultati opposti, ma bisogna valutare l'influenza che tali modifiche hanno con le altre geometrie del modello considerato prima di poter stabilire se hanno portato o no dei miglioramenti.

Di seguito si riportano le schermate relative alle iterazioni del coefficiente di drag e di lift, limitando il range in un intervallo di valori interessante. La fluttuazione dei valori non è un fattore discriminante poiché è inevitabile ci sia ed è relativamente contenuta, perciò è possibile fare la media degli ultimi valori senza eccessiva perdita di accuratezza.

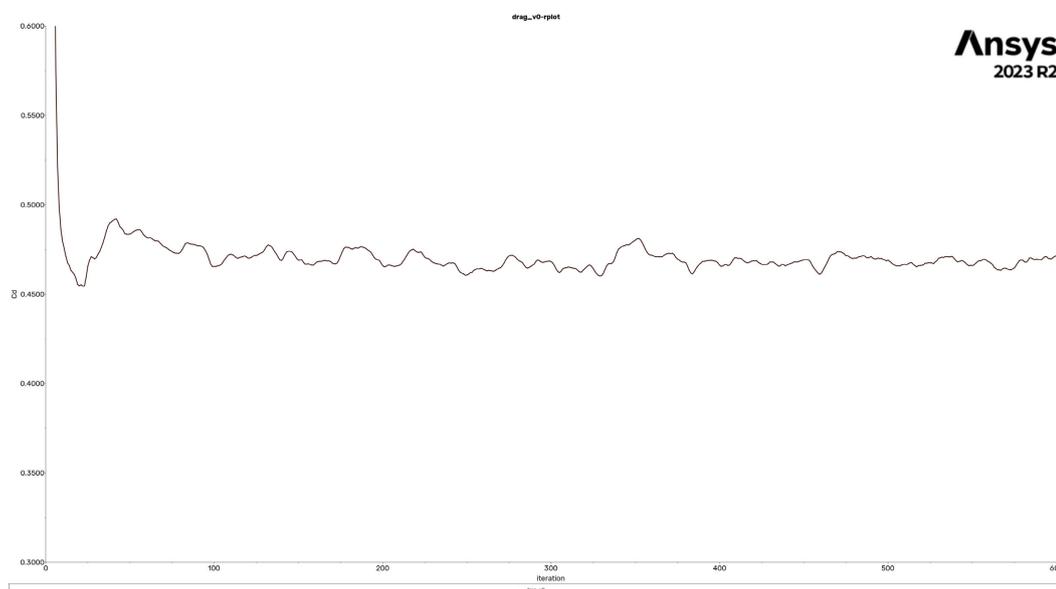


Figura 22: *Andamento del coefficiente di drag C_d nel modello 2.2.*

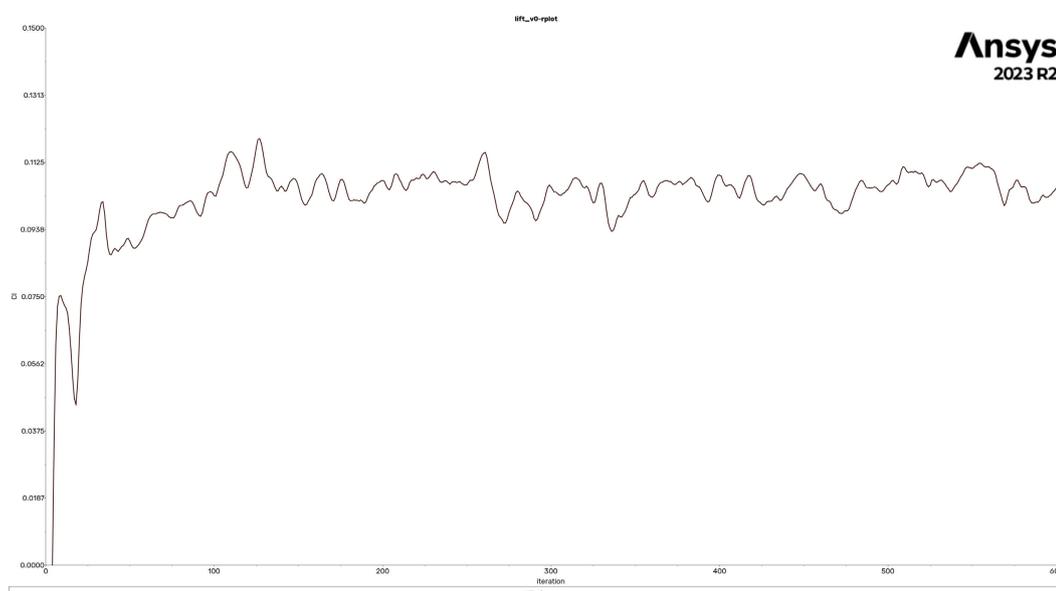


Figura 23: *Andamento del coefficiente di lift C_l nel modello 2.2.*

3.8 Ottimizzazione 3: inclinazione carena inferiore

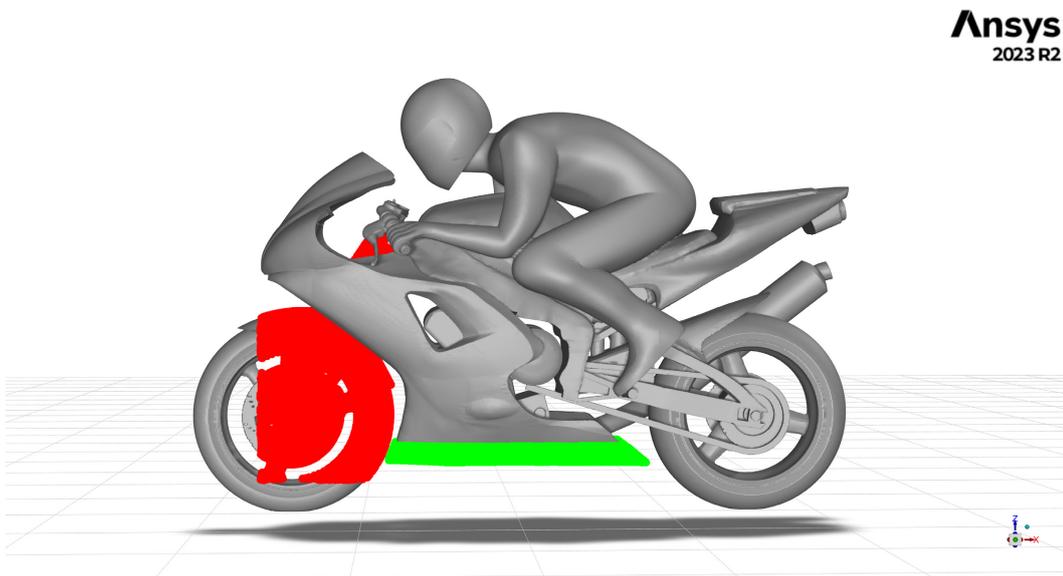
La terza modifica che è stata effettuata al modello di partenza ha riguardato il fondo della carenatura, in particolare la zona della punta, subito dietro la ruota anteriore.

Infatti, poiché si è notato che c'era una forte concentrazione di turbolenza in quella zona, si è provato ad abbassare la punta della carena verso il basso, applicando una rotazione con asse nella parte di carena vicina alla ruota posteriore, in modo da garantire una rotazione progressiva di tutto il profilo inferiore della carenatura.

Per prima cosa si è definito il dominio di punti della mesh che saranno modificati, utilizzando la funzione "Encaps" nella forma di "box". Successivamente sono state definiti due set nella sezione "Surfs", specificando quali superfici dovranno rimanere inalterate e quali, invece, saranno oggetto di modifica.

Le superfici che subiranno una modifica verranno ruotate in direzione anti-oraria di 1 grado attorno ad un asse parallelo ad Y posto davanti alla ruota posteriore e il risultato finale dipenderà dal fattore di amplificazione scelto nella sezione "Morph".

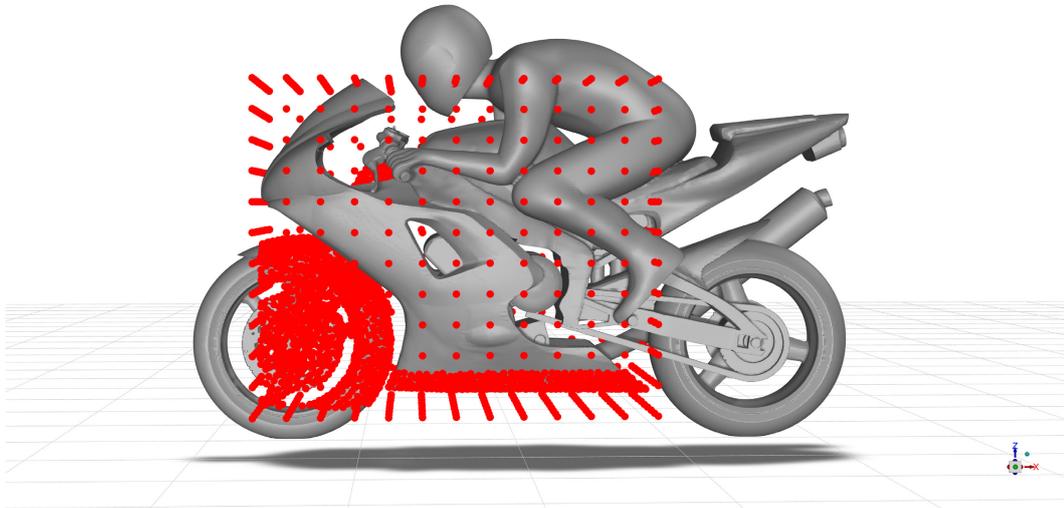
Nella figura le superfici in verde sono quelle che subiranno modifiche, mentre in rosso quelle vincolate a rimanere inalterate.



A questo punto è possibile passare alla funzione "Solve", nella quale vengono inseriti i parametri di affinamento delle nuvole di punti e grazie alla quale è possibile stimare preventivamente il numero di nodi che saranno modificati. Nel caso in questione si è scelto di utilizzare un "LCM Distance" di 0.02, tale da garantire un totale di 3300 punti. Da figura seguente si può riconoscere

sia il dominio di "Encap", sia la nuvola di punti che saranno oggetto di mesh morphing, indistintamente se si muoveranno o no.

Ansys
2023 R2



Prima di procedere con l'operazione di morphing nell'omonima sezione "Morph", è stato scelto di utilizzare la funzione "Preview" per avere un'idea verosimile delle modifiche che apporterà il morphing.

Una volta avviata e terminata l'operazione di "Morph" con un coefficiente di amplificazione pari a 2, non sono stati generati volumi negativi, perciò la mesh risulterà modificata e verrà salvata e utilizzata per le successive analisi riguardanti il coefficiente di drag e di lift.

A questo punto sono state inizializzate e avviate le iterazioni riguardanti il calcolo del coefficiente di drag e di lift e, una volta terminati, i risultati sono stati:

	Iniziale	Ottimizzazione 3.1	Incremento
Coefficiente di drag C_d	0.4900	0.4909	0.1836%
Coefficiente di lift C_l	0.0860	0.0687	-20.1162%
Forza di drag F_d [N]	487.2254	489.8727	2.6472 N
Forza di lift F_l [N]	85.5130	68.5562	-16.9567 N



Figura 24: *Contour delle turbolenze nel modello iniziale.*



Figura 25: *Contour delle turbolenze del modello modificato con l'ottimizzazione 3.1.*

Dal confronto tra i contour si può notare come la turbolenza in prossimità della ruota anteriore, sotto la carena inferiore, si sia concentrata in meno spazio rispetto alla carena con inclinazione originale, portando maggiore turbolenza in prossimità dell'asfalto e della zona dei radiatori della moto, ma riducendone gli effetti andando verso la ruota posteriore.

Inoltre c'è stato un contributo anche nella zona subito dietro la fine della moto, poiché la nuvola di turbolenza si è ridotta in grandezza, ma ha aumentato la sua intensità in prossimità del parafrangente posteriore.

Infatti le zone in cui il contour è vuoto rappresentano o zone in cui è presente o un componente della motocicletta o del pilota, oppure zone in cui, per la scala di visualizzazione scelta e poiché è stato abilitato il "Clip to Range" tra le opzioni di visualizzazione dei contour, la turbolenza va oltre il valore massimo.

Perciò il fatto che l'area non colorata dietro il codone della moto si sia ridotta indica un abbassamento della turbolenza in quei punti.

Di seguito si riportano le schermate relative alle iterazioni del coefficiente di drag e di lift, limitando il range in un intervallo di valori interessante. La fluttuazione dei valori non è un fattore discriminante poiché è inevitabile ci sia ed è relativamente contenuta, perciò è possibile fare la media degli ultimi valori senza eccessiva perdita di accuratezza.

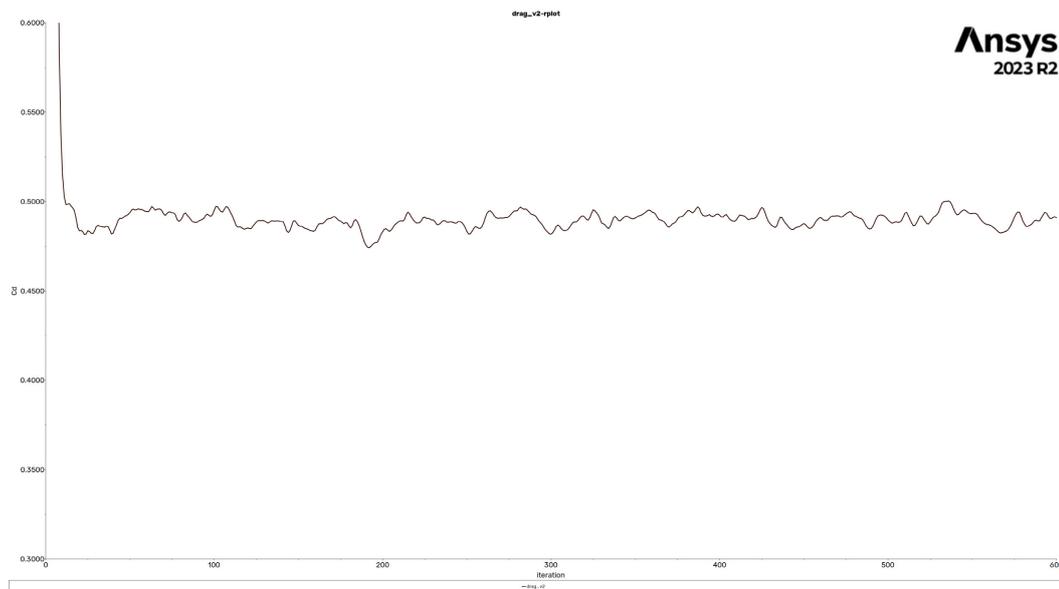


Figura 26: Andamento del coefficiente di drag C_d nel modello 3.1.

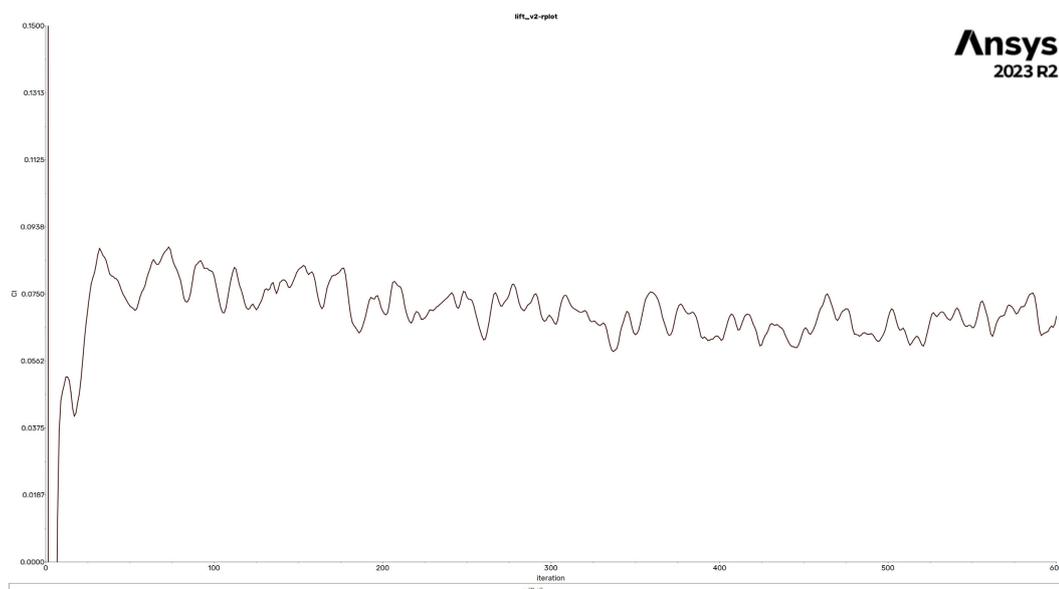


Figura 27: Andamento del coefficiente di lift C_l nel modello 3.1.

Mantenendo inalterato il setup di RBF Morph è stata fatta una modifica analoga alla precedente, invertendo la direzione di rotazione attorno ad Y , cioè applicandola in senso orario.

Il risultato in termini dei coefficienti di drag e lift è stato il seguente:

	Iniziale	Ottimizzazione 3.2	Incremento
Coefficiente di drag C_d	0.4900	0.4849	-1.040%
Coefficiente di lift C_l	0.0860	0.0914	-6.2790%
Forza di drag F_d [N]	487.2254	482.0266	-5.1987 N
Forza di lift F_l [N]	85.5130	90.8584	5.3453 N



Figura 28: *Contour delle turbolenze nel modello iniziale.*



Figura 29: *Contour delle turbolenze del modello modificato con l'ottimizzazione 3.2.*

Dal confronto tra i contour si può notare come la turbolenza in prossimità della ruota anteriore sia pressoché inalterata rispetto alla carena con inclinazione originale, portando maggiore turbolenza nella zona dei radiatori della moto. Questo potrebbe rappresentare un vantaggio per il raffreddamento della moto, ma solo nel caso in cui la turbolenza non rimanga intrappolata nella carena.

Anche nella zona posteriore dopo la fine della moto il contributo non è particolarmente significativo, perciò questa modifica non presenta particolare interesse ai fini dell'ottimizzazione aerodinamica che si sta effettuando.

Infatti le zone in cui il contour è vuoto rappresentano o zone in cui è presente o un componente della motocicletta o del pilota, oppure zone in cui, per la scala di visualizzazione scelta e poiché è stato abilitato il "Clip to Range" tra le

opzioni di visualizzazione dei contour, la turbolenza va oltre il valore massimo. Perciò il fatto che l'area non colorata dietro il codone della moto si sia ridotta indica un abbassamento della turbolenza in quei punti.

Di seguito si riportano le schermate relative alle iterazioni del coefficiente di drag e di lift, limitando il range in un intervallo di valori interessante. La fluttuazione dei valori non è un fattore discriminante poiché è inevitabile ci sia ed è relativamente contenuta, perciò è possibile fare la media degli ultimi valori senza eccessiva perdita di accuratezza.

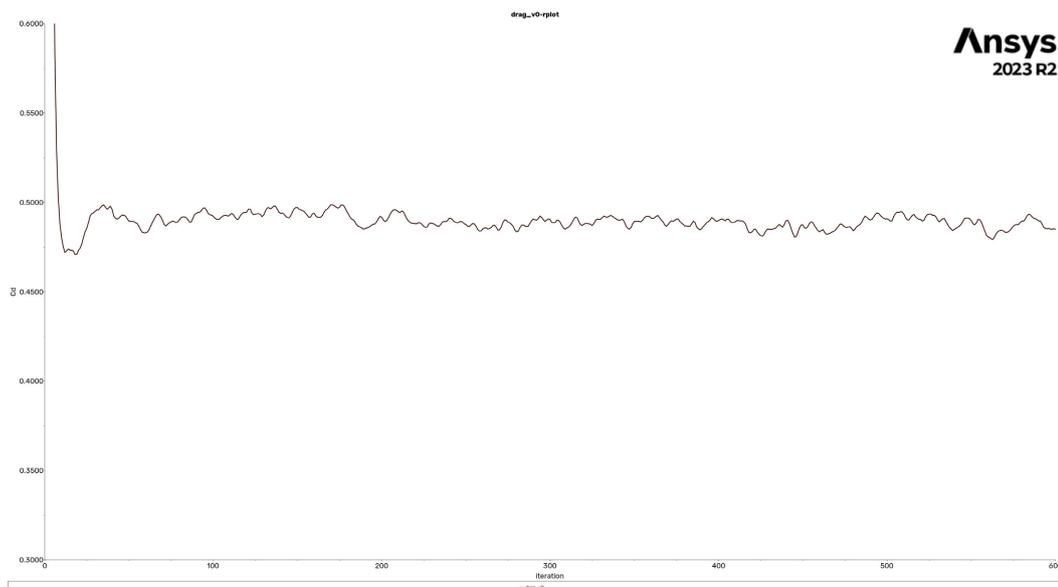


Figura 30: *Andamento del coefficiente di drag C_d nel modello 3.2.*

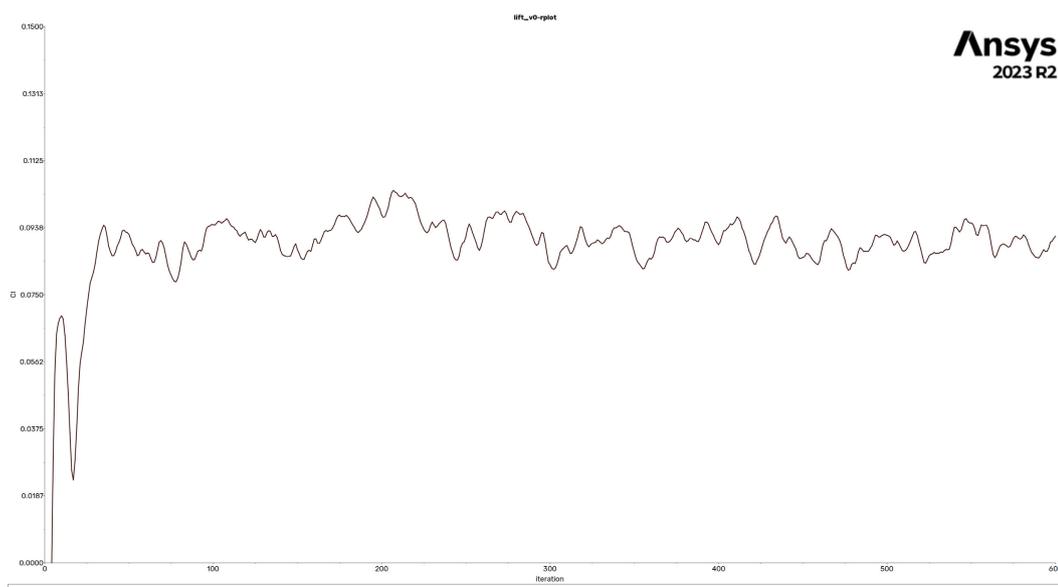


Figura 31: *Andamento del coefficiente di lift C_l nel modello 3.2.*

3.9 Ottimizzazione 4: allargamento codone

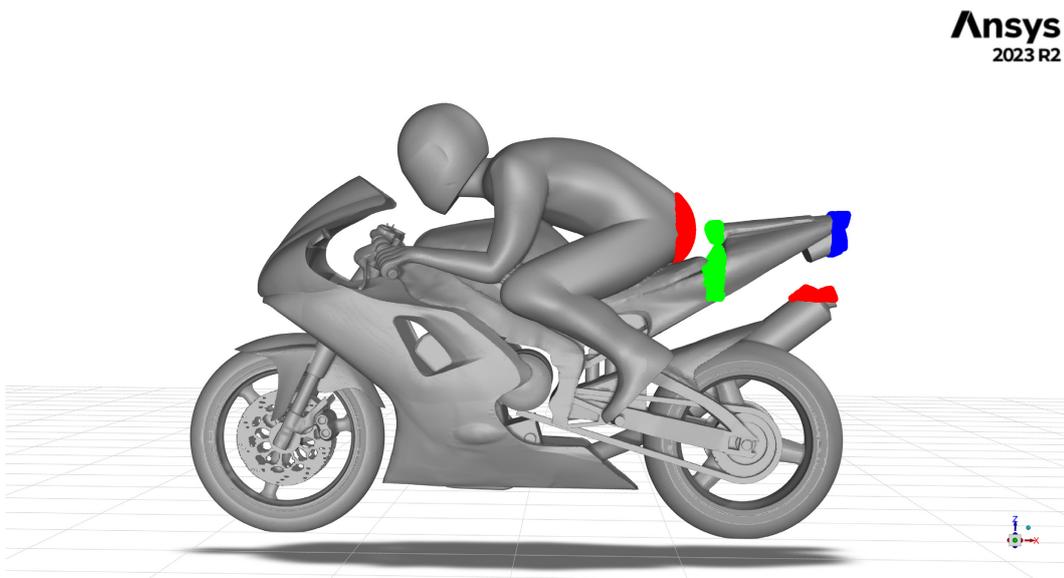
La quarta modifica che è stata effettuata al modello di partenza ha riguardato il codone della carenatura, in particolare nella parte terminale della punta, poiché è la zona responsabile del distacco del fluido dalla motocicletta ed è la più soggetta a risentire delle turbolenze generate dalle superfici precedenti.

Infatti, poiché si è notato che c'era una forte concentrazione di turbolenza in quella zona, si è provato a modificare la larghezza del codone, applicando un fattore di scala lungo l'asse Y nella parte terminale del codone, che comprende anche il faro posteriore, in modo da garantire una superficie guidata maggiore per i flussi provenienti dalla schiena del pilota.

Per prima cosa si è definito il dominio di punti della mesh che saranno modificati, utilizzando la funzione "Encaps" nella forma di "box". Successivamente sono state definiti tre set nella sezione "Surfs", specificando quali superfici dovranno rimanere inalterate e quali, invece, saranno oggetto di modifica.

Le superfici che subiranno una modifica saranno alterate utilizzando il comando "Scale" di RBF Morph di un fattore 1.1 in direzione Y , cioè subiranno una variazione del 10% in tale direzione, e il risultato finale dipenderà dal fattore di amplificazione scelto nella sezione "Morph".

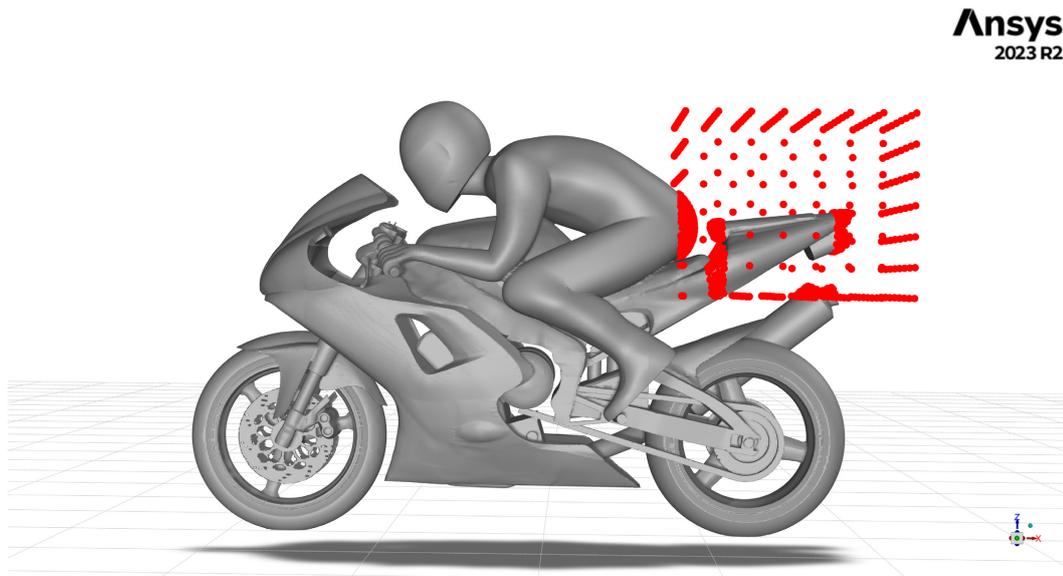
Nella figura le superfici in verde e in blu sono quelle che subiranno modifiche, mentre in rosso e verde quelle vincolate a rimanere inalterate dopo le modifiche.



Ansys
2023 R2

A questo punto è possibile passare alla funzione "Solve", nella quale vengono inseriti i parametri di affinamento delle nuvole di punti e grazie alla quale è possibile stimare preventivamente il numero di nodi che saranno modificati. Nel caso in questione si è scelto di utilizzare un "LCM Distance" di 0.02, tale da garantire un totale di 3300 punti.

Prima di procedere con l'operazione di morphing nell'omonima sezione "Morph", è stato scelto di utilizzare la funzione "Preview" per avere un'idea verosimile delle modifiche che apporterà il morphing.



Da questa figura si può riconoscere sia il dominio di "Encap", sia la nuvola di punti che saranno oggetto di mesh morphing, indistintamente se si muoveranno o no.

Una volta avviata e terminata l'operazione di "Morph" con un coefficiente di amplificazione pari a 2, non sono stati generati volumi negativi, perciò la mesh risulterà modificata e verrà salvata e utilizzata per le successive analisi riguardanti il coefficiente di drag e di lift.

A questo punto sono state inizializzate e avviate le iterazioni riguardanti il calcolo del coefficiente di drag e di lift e, una volta terminati, i risultati sono stati:

	Iniziale	Ottimizzazione 4.1	Incremento
Coefficiente di drag C_d	0.4900	0.4912	0.2448%
Coefficiente di lift C_l	0.0860	0.0897	4.3023%
Forza di drag F_d [N]	487.2254	482.0266	1.1932 N
Forza di lift F_l [N]	85.5130	90.8584	3.6790 N



Figura 32: *Contour delle turbolenze nel modello iniziale.*

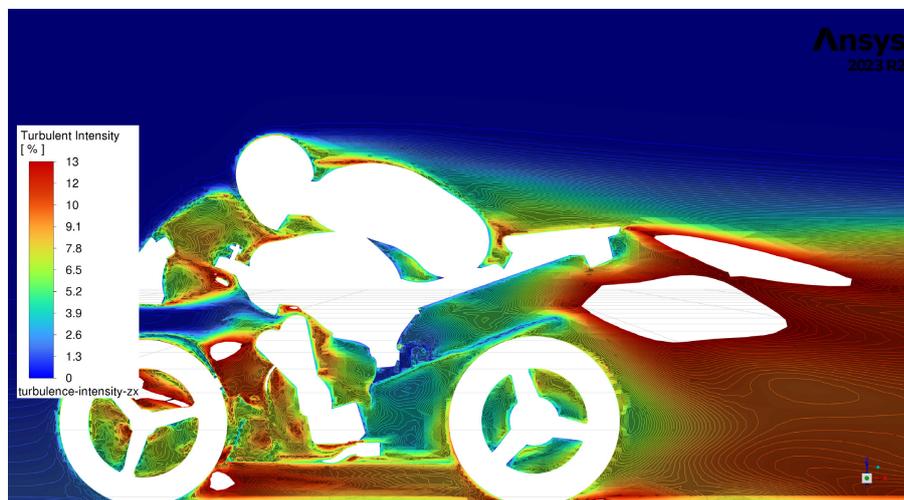


Figura 33: *Contour delle turbolenze del modello modificato con l'ottimizzazione 4.1.*

Dal confronto tra i contour è possibile notare una riduzione della turbolenza esternamente al codone della moto, poiché l'area in cui il contour risulta vuoto rappresenta o un componente della moto o il pilota, oppure una turbolenza che ha intensità maggiore del massimo valore della scala impostata, poiché è stato abilitato il "Clip to Range" tra le opzioni di visualizzazione dei contour. Perciò il fatto che la nuvola dietro la moto si sia ristretta indica proprio una riduzione dei fenomeni turbolenti in quei punti.

Tuttavia si genera una lieve turbolenza che prima non c'era nella zona tra schiena del pilota e inizio del codone, dovuto al fatto che il codone è stato allargato in direzione Y rispetto a quello iniziale, perciò si comporta come se fosse un piccolo alettone, influenzando i flussi provenienti dalla schiena del pilota.

Di seguito si riportano le schermate relative alle iterazioni del coefficiente di drag e di lift, limitando il range in un intervallo di valori interessante. La fluttuazione dei valori non è un fattore discriminante poiché è inevitabile ci sia ed è relativamente contenuta, perciò è possibile fare la media degli ultimi valori senza eccessiva perdita di accuratezza.

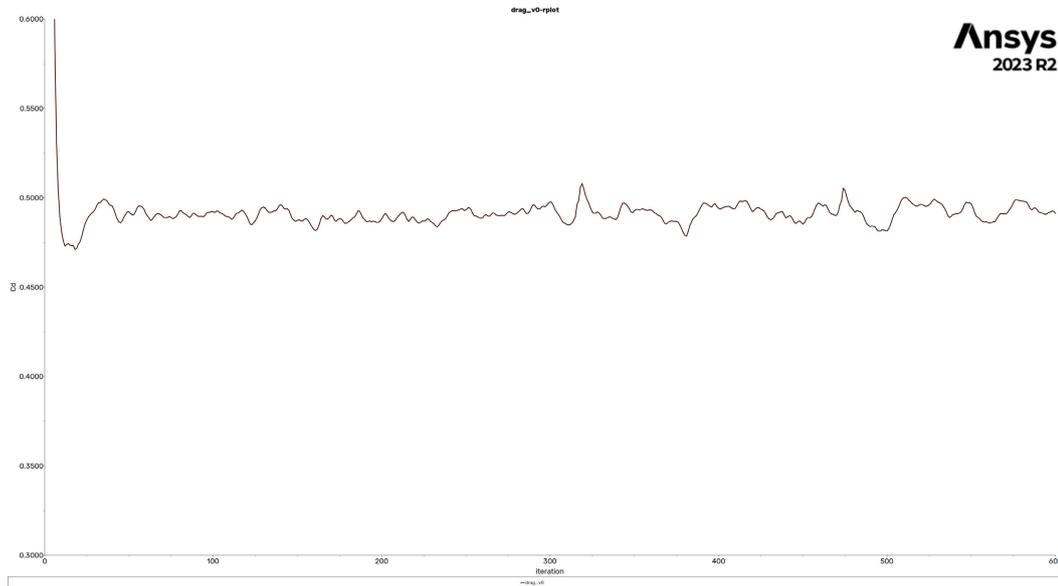


Figura 34: *Andamento del coefficiente di drag C_d nel modello 4.1.*

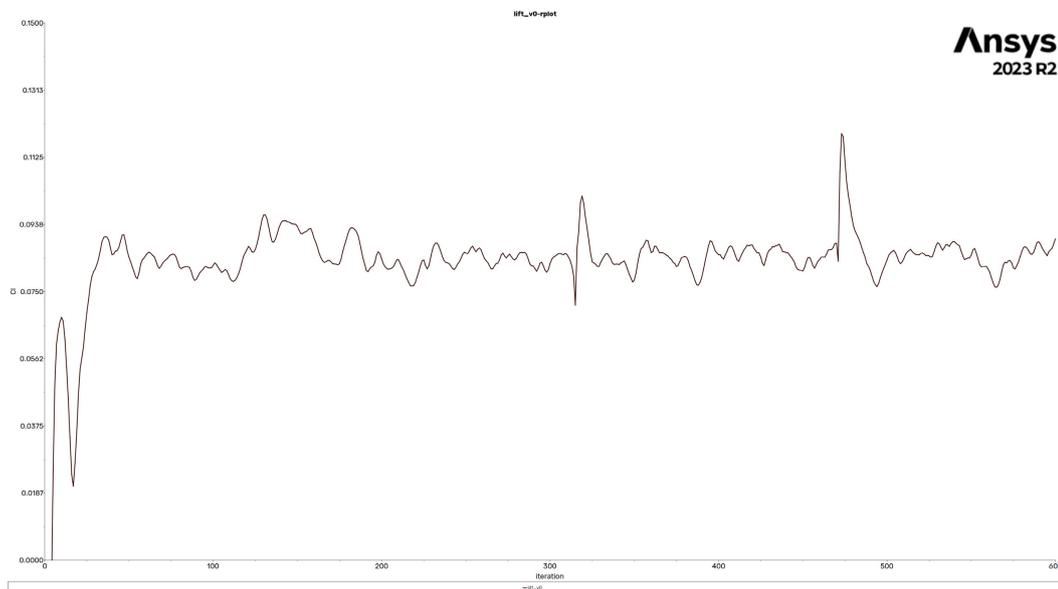


Figura 35: *Andamento del coefficiente di lift C_l nel modello 4.1.*

Mantenendo inalterato il setup di RBF Morph è stata fatta una modifica analoga alla precedente, invertendo il parametro di scala in direzione Y , cioè passando da 1.1 a 0.9, cioè restringendo il codone anziché allargarlo.

Il risultato in termini dei coefficienti di drag e lift è stato il seguente:

	Iniziale	Ottimizzazione 4.2	Incremento
Coefficiente di drag C_d	0.4900	0.4880	-0.4081%
Coefficiente di lift C_l	0.0860	0.084	-2.3255%
Forza di drag F_d [N]	487.2254	485.2367	-1.9886 N
Forza di lift F_l [N]	85.5130	83.5243	-1.9886 N



Figura 36: *Contour delle turbolenze nel modello iniziale.*



Figura 37: *Contour delle turbolenze del modello modificato con l'ottimizzazione 4.2.*

In questo caso, dal confronto tra i contour è possibile notare una notevole riduzione della turbolenza esternamente al codone della moto, poiché l'area in cui il contour risulta vuoto rappresenta o un componente della moto o il pilota, oppure una turbolenza che ha intensità maggiore del massimo valore della scala impostata, poiché è stato abilitato il "Clip to Range" tra le opzioni di visualizzazione dei contour. Perciò il fatto che la nuvola dietro la moto si sia ristretta indica proprio una riduzione dei fenomeni turbolenti in quei punti. Questo è un risultato che ci si poteva aspettare poiché, nonostante la sezione retta complessiva della moto non venga alterata dal restringimento del codone, i flussi che si trovano in prossimità di quest'ultimo risentono di una geometria meno voluminosa, perciò tenderanno a seguire la forma più appuntita del codone, generando minori turbolenze.

Di seguito si riportano le schermate relative alle iterazioni del coefficiente di drag e di lift, limitando il range in un intervallo di valori interessante. La fluttuazione dei valori non è un fattore discriminante poiché è inevitabile ci sia ed è relativamente contenuta, perciò è possibile fare la media degli ultimi valori senza eccessiva perdita di accuratezza.

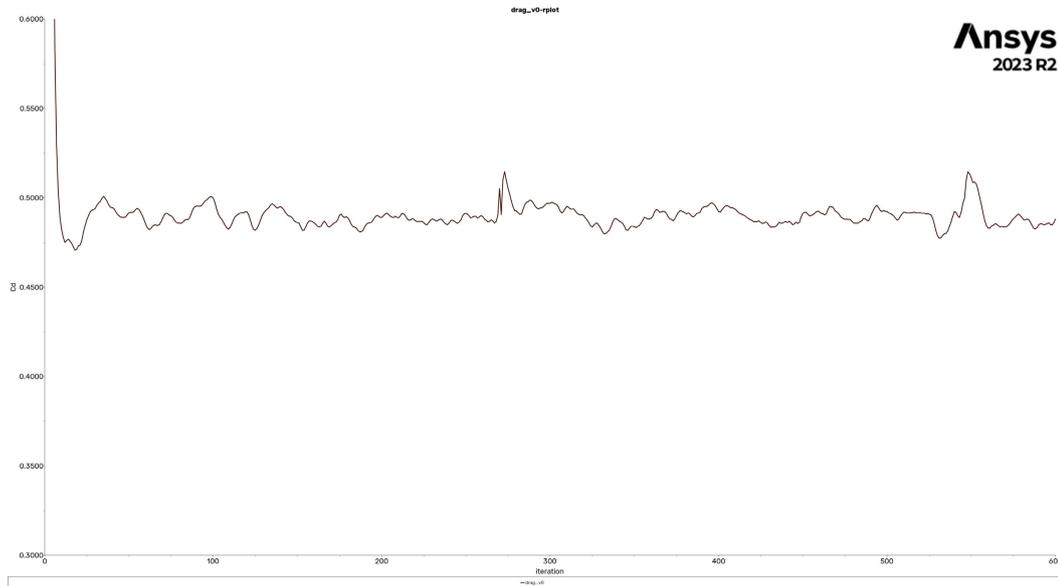


Figura 38: *Andamento del coefficiente di drag C_d nel modello 4.2.*

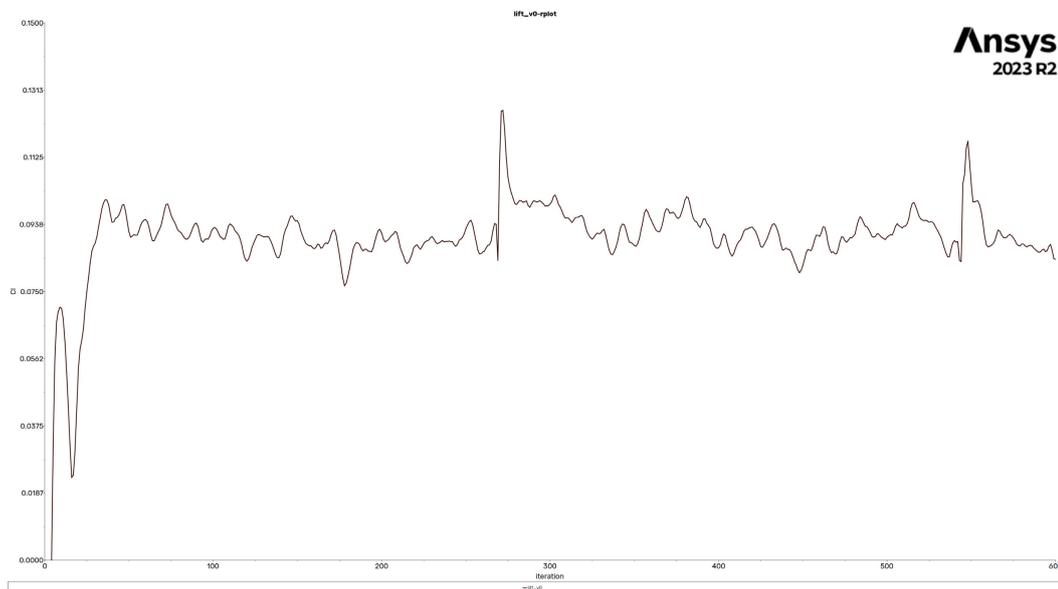


Figura 39: *Andamento del coefficiente di lift C_l nel modello 4.2.*

3.10 Ottimizzazione 5: traslazione verticale codino

L'ultima modifica apportata al modello iniziale della motocicletta è stata una rotazione della parte finale del codino, portandolo prima verso l'alto (allontanandolo dalla ruota posteriore con una rotazione antioraria) sia verso il basso (avvicinandosi alla ruota posteriore con una rotazione oraria).

Grazie a questa modifica sarà possibile influenzare il flusso d'aria proveniente dalla schiena del pilota, che poi attraverserà il codino e si staccherà dalle superfici della moto.

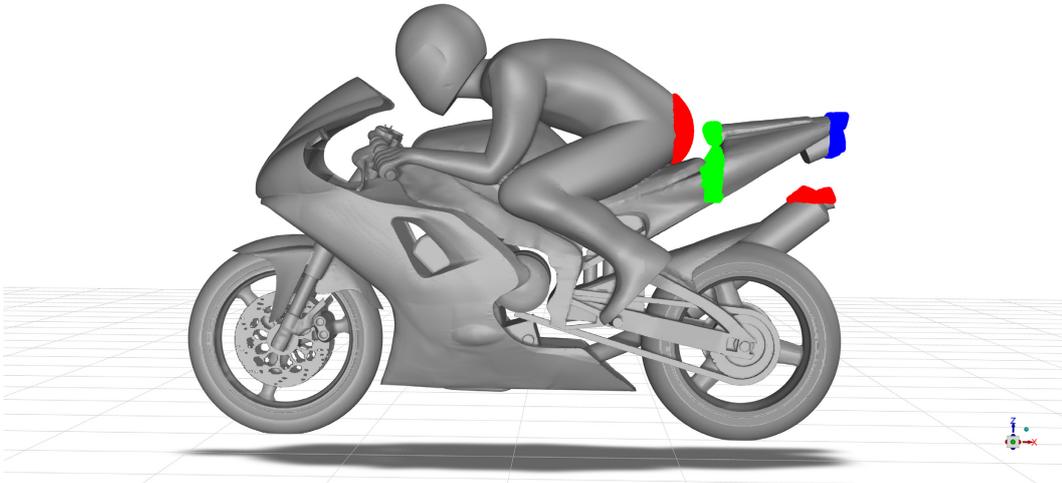
Questa modifica risulta particolarmente importante poiché influenza le turbolenze che avvengono dopo aver attraversato tutte le superfici della moto, e quindi non sono più controllabili dalla geometria di quest'ultima. Inoltre la zona posteriore è una di quelle con maggiore concentrazione di turbolenza, perciò incide pesantemente sui valori dei coefficienti di drag e lift.

La modifica utilizzata è stata quella di ruotare di 1 grado il codone attorno ad un asse parallelo a Y che attraversa la sella del pilota, in modo da avere il maggior spostamento nella parte terminale del codone e garantire un distacco più graduale e guidato dei flussi d'aria dalla moto. Il risultato finale dipenderà dal fattore di amplificazione scelto nella sezione "Morph".

Per prima cosa si è definito il dominio di punti della mesh che saranno modificati, utilizzando la funzione "Encaps" nella forma di "box". Successivamente sono state definiti tre set nella sezione "Surfs", specificando quali superfici dovranno rimanere inalterate e quali, invece, saranno oggetto di modifica.

Nella figura le superfici in verde e in blu sono quelle che subiranno modifiche, mentre in rosso quelle vincolate a rimanere inalterate.

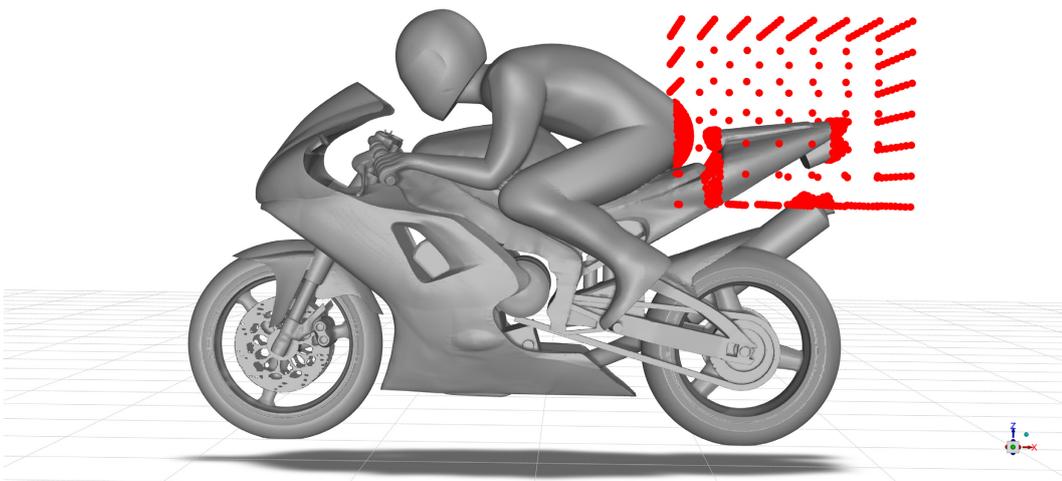
Ansys
2023 R2



A questo punto è possibile passare alla funzione "Solve", nella quale vengono inseriti i parametri di affinamento delle nuvole di punti e grazie alla quale è possibile stimare preventivamente il numero di nodi che saranno modificati. Nel caso in questione si è scelto di utilizzare un "LCM Distance" di 0.015, tale da garantire un totale di 922 punti.

Prima di procedere con l'operazione di morphing nell'omonima sezione "Morph", è stato scelto di utilizzare la funzione "Preview" per avere un'idea verosimile delle modifiche che apporterà il morphing.

Ansys
2023 R2



Da questa figura si può riconoscere sia il dominio di "Encap", sia la nuvola di punti che saranno oggetto di mesh morphing, indistintamente se si muoveranno o no.

Una volta avviata e terminata l'operazione di "Morph" con un coefficiente di amplificazione pari a 2, non sono stati generati volumi negativi, perciò la mesh risulterà modificata e verrà salvata e utilizzata per le successive analisi riguardanti il coefficiente di drag e di lift.

A questo punto sono state inizializzate e avviate le iterazioni riguardanti il calcolo del coefficiente di drag e di lift e, una volta terminati, i risultati sono stati:

	Iniziale	Ottimizzazione 5.1	Incremento
Coefficiente di drag C_d	0.4900	0.489	-0.2040%
Coefficiente di lift C_l	0.0860	0.0938	9.0697%
Forza di drag F_d [N]	487.2254	486.2311	-0.9943 N
Forza di lift F_l [N]	85.5130	93.2688	7.7558 N

Il contour delle turbolenze (in una scala da 0% a 13%) può essere confrontato con quello del modello iniziale su un piano di sezionamento ZX:



Figura 40: *Contour delle turbolenze nel modello iniziale.*



Figura 41: *Contour delle turbolenze del modello modificato con l'ottimizzazione 5.1.*

Dal confronto tra le figure è possibile notare una notevole riduzione della turbolenza esternamente al codone della moto, poiché l'area in cui il contour risulta vuoto rappresenta o un componente della moto o il pilota, oppure una turbolenza che ha intensità maggiore del massimo valore della scala impostata, poiché è stato abilitato il "Clip to Range" tra le opzioni di visualizzazione dei contour. Perciò il fatto che la nuvola dietro la moto si sia ristretta indica proprio una riduzione dei fenomeni turbolenti in quei punti.

Nonostante un leggero aumento tra ruota posteriore e parte inferiore del codone, il risultato complessivo risulta essere tra i più significativi per quanto riguarda la parte posteriore della turbolenza.

Di seguito si riportano le schermate relative alle iterazioni del coefficiente di drag e di lift, limitando il range in un intervallo di valori interessante. La fluttuazione dei valori non è un fattore discriminante poiché è inevitabile ci sia ed è relativamente contenuta, perciò è possibile fare la media degli ultimi valori senza eccessiva perdita di accuratezza.

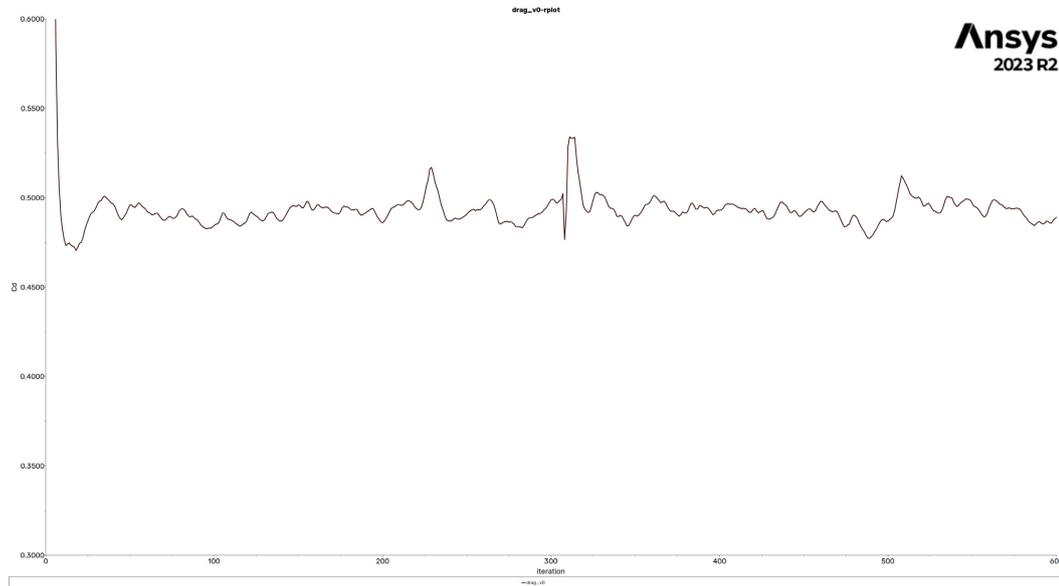


Figura 42: *Andamento del coefficiente di drag C_d nel modello 5.1.*

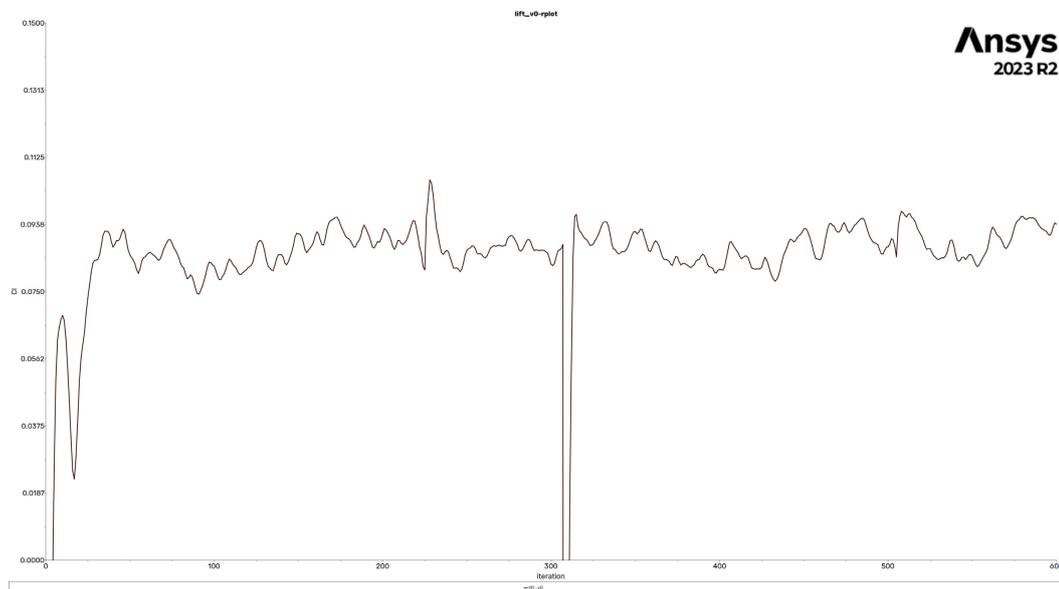


Figura 43: *Andamento del coefficiente di lift C_l nel modello 5.1.*

Mantenendo inalterato il setup di RBF Morph è stata fatta una modifica analoga alla precedente, invertendo il verso di rotazione attorno all'asse Y , passando dal senso anti-orario al senso orario, cioè abbassando la punta della carenatura anziché alzarla.

Il risultato in termini dei coefficienti di drag e lift è stato il seguente:

	Iniziale	Ottimizzazione 4.1	Incremento
Coefficiente di drag C_d	0.4900	0.4912	0.2448%
Coefficiente di lift C_l	0.0860	0.0897	4.3023%
Forza di drag F_d [N]	487.2254	482.0266	1.1932 N
Forza di lift F_l [N]	85.5130	90.8584	3.6790 N

Il contour delle turbolenze (in una scala da 0% a 13%) può essere confrontato con quello del modello iniziale su un piano di sezionamento ZX:



Figura 44: *Contour delle turbolenze nel modello iniziale.*



Figura 45: *Contour delle turbolenze del modello modificato con l'ottimizzazione 5.2.*

In questo caso, dal confronto tra le figure è possibile notare una notevole riduzione della turbolenza esternamente al codone della moto, poiché l'area in cui il contour risulta vuoto rappresenta o un componente della moto o il pilota, oppure una turbolenza che ha intensità maggiore del massimo valore della scala impostata, poiché è stato abilitato il "Clip to Range" tra le opzioni di visualizzazione dei contour. Perciò il fatto che la nuvola dietro la moto si sia ristretta indica proprio una riduzione dei fenomeni turbolenti in quei punti. Questo è un risultato che ci si poteva aspettare poiché il passaggio dalla schiena del pilota al codone della moto risulta essere più graduale (grazie ad un angolo

maggiore tra le due superfici), e quindi i flussi d'aria risultano essere meno deviati, riducendo l'insorgenza di turbolenze dannose.

Di seguito si riportano le schermate relative alle iterazioni del coefficiente di drag e di lift, limitando il range in un intervallo di valori interessante. La fluttuazione dei valori non è un fattore discriminante poiché è inevitabile ci sia ed è relativamente contenuta, perciò è possibile fare la media degli ultimi valori senza eccessiva perdita di accuratezza.

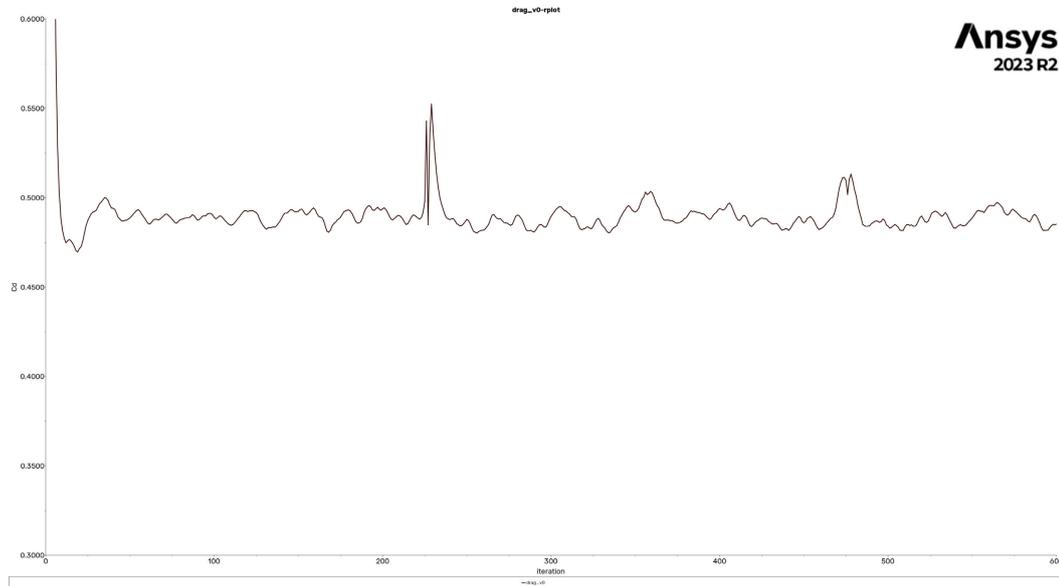


Figura 46: *Andamento del coefficiente di drag C_d nel modello 5.2.*

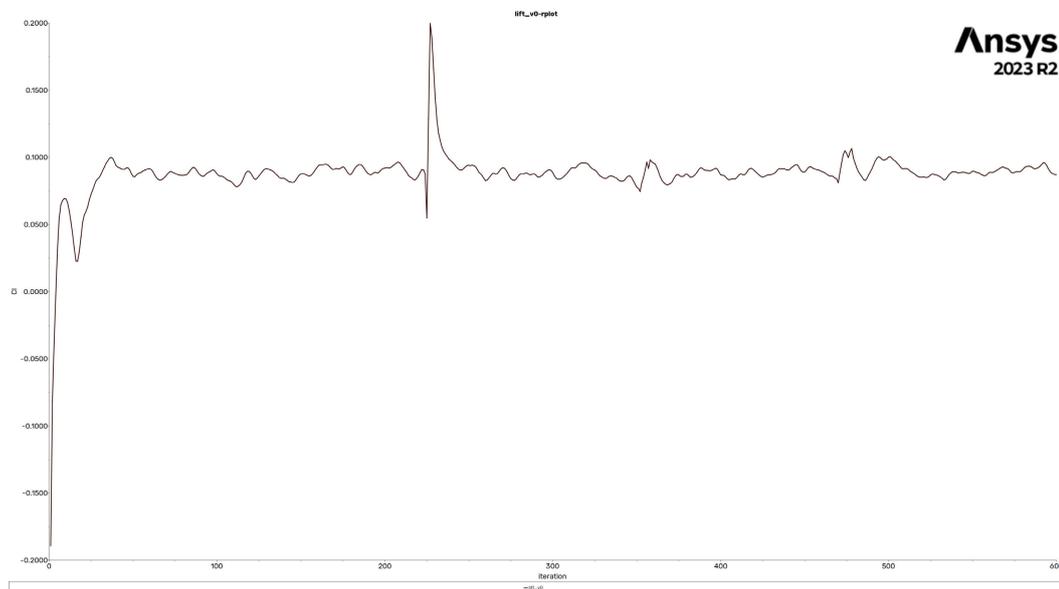


Figura 47: *Andamento del coefficiente di lift C_l nel modello 5.2.*

3.11 Unione ottimizzazioni

Avendo apportato singolarmente le modifiche alle geometrie della motocicletta, e avendo ottenuto un'ampia gamma di valori relativi al coefficiente di drag e di lift, risulta interessante simulare una combinazione di quest'ultime.

Tuttavia, essendo il numero delle possibili combinazioni molto elevato, si è scelto di applicare sequenzialmente (partendo dall'anteriore della moto, fino ad arrivare alla zona posteriore) le ottimizzazioni che singolarmente hanno apportato il maggior guadagno tra le due proposte per ogni area d'interesse.

In questo modo sarà possibile valutare non solo gli effetti della sovrapposizione delle modifiche applicate in maniera sequenziale, ma anche analizzare quale tra queste abbia un impatto complessivo maggiore.

Per effettuare le combinazioni delle ottimizzazioni si è utilizzato il tab "Multi-Sol" presente all'interno di RBF Morph, utilizzando i coefficienti di amplificazione già precedentemente impostati nelle singole ottimizzazioni, ossia un coefficiente 1 per la modifica di larghezza della carena anteriore e un coefficiente 2 per tutte le altre.

Per semplicità, si riportano nella seguente tabella le simulazioni fatte utilizzando il Multi-Sol e rinominandoli progressivamente, a seconda del numero di modifiche aggiunte al modello iniziale:

	Ott-1	Ott-2.1	Ott-3.1	Ott-4.2	Ott-5.2
Multi-1	✓				
Multi-2	✓	✓			
Multi-3	✓	✓	✓		
Multi-4	✓	✓	✓	✓	
Multi-5	✓	✓	✓	✓	✓

I risultati ottenuti in termini di coefficiente di drag e coefficiente di lift sono:

	Area	C_d	C_l	ΔC_d	ΔC_l
Iniziale	0.6443	0.4900	0.0860	-	-
Multi-1	0.6381	0.4973	0.0807	+1.48%	-6.16%
Multi-2	0.6413	0.5147	0.0684	+5.04%	-20.46%
Multi-3	0.6417	0.5140	0.0638	+4.89%	-25.81%
Multi-4	0.6435	0.5259	0.0626	+7.32%	-27.2%
Multi-5	0.6417	0.5109	0.0774	+4.26%	-10%

Risulta evidente come i contributi delle singole ottimizzazioni non si sommino linearmente, ma siano dipendenti le une dalle altre, interferendo sugli effetti

complessivi.

La scelta di applicare questo particolare set di ottimizzazioni non esclude che altre combinazioni possano dare benefici maggiori.

Per quanto riguarda gli effetti delle modifiche multiple ai fini delle turbolenze, si possono confrontare i contour del modello iniziale con quello finale, in particolare su un piano di sezionamento per visualizzare l'andamento del flusso esterno alla moto, e uno tridimensionale per osservare i particolari punti del modello in cui si concentrano le turbolenze:

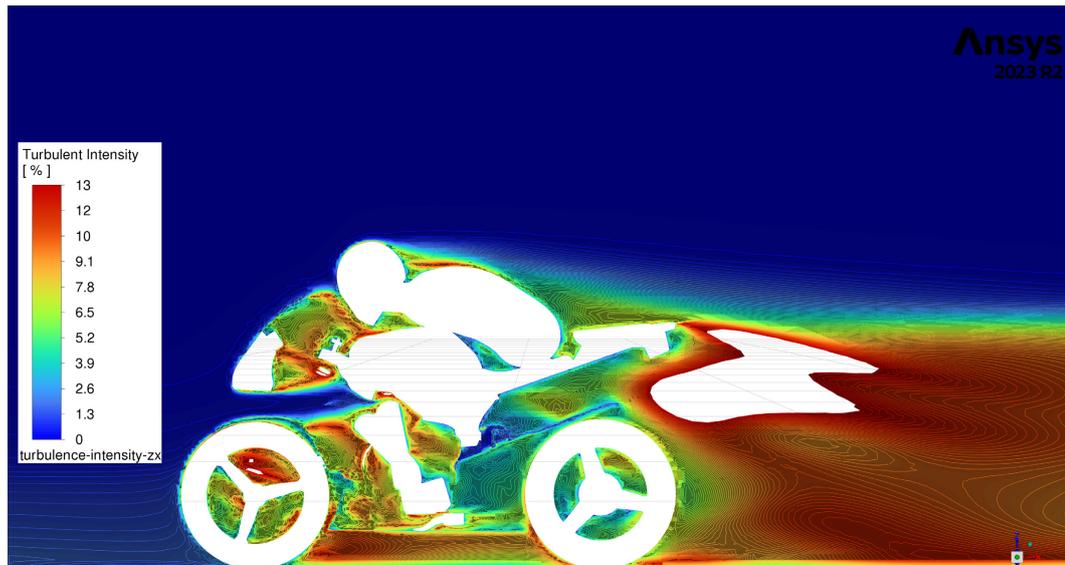


Figura 48: *Contour delle turbolenze nel modello iniziale.*



Figura 49: *Contour delle turbolenze nel modello Multi-5.*

Dal confronto tra i contour sul piano ZX del modello iniziale e del modello

Multi-5 si può notare come le zone interessate da modifica abbiano contribuito a ridurre le turbolenze, eccezion fatta per quelle in prossimità dei radiatori, che sono aumentate a causa del maggior volume disponibile a seguito dell'allargamento della carena anteriore.

Tuttavia, come già spiegato precedentemente, questo non è necessariamente uno svantaggio, ma avrebbe bisogno di ulteriori approfondimenti per essere validato.

Per quanto riguarda le altre modifiche, lo spostamento del casco ha portato l'effetto desiderato nella parte alta della schiena, la modifica nella parte inferiore della carena ha fatto sì che le turbolenze rimanessero più circoscritte in una zona vicino alla ruota anteriore anziché prolungarsi fino a quella posteriore, mentre le ottimizzazioni relative al codone della moto sono quelle che risultano essere più significative, perché hanno ridotto quasi del tutto le turbolenze con intensità maggiore del 13%.

Si può quindi concludere che l'ottimizzazione complessiva Multi-5 ha apportato significativi miglioramenti rispetto al modello iniziale e risulta essere una buona base di partenza per ulteriori ottimizzazioni.

Infine si vuole analizzare anche tridimensionalmente l'andamento delle turbolenze, attraverso i seguenti contour:

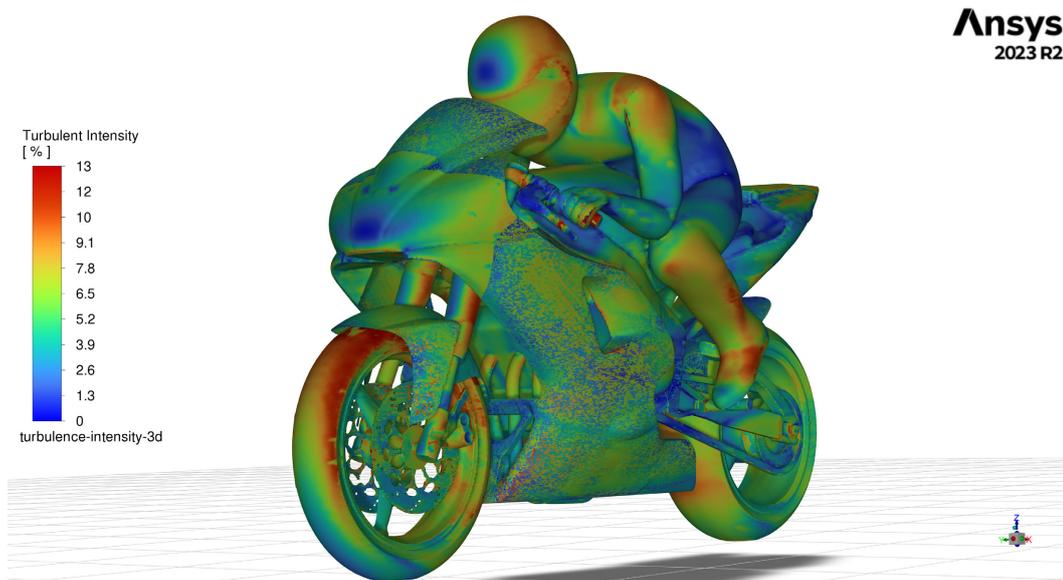


Figura 50: *Contour tridimensionale del modello iniziale.*

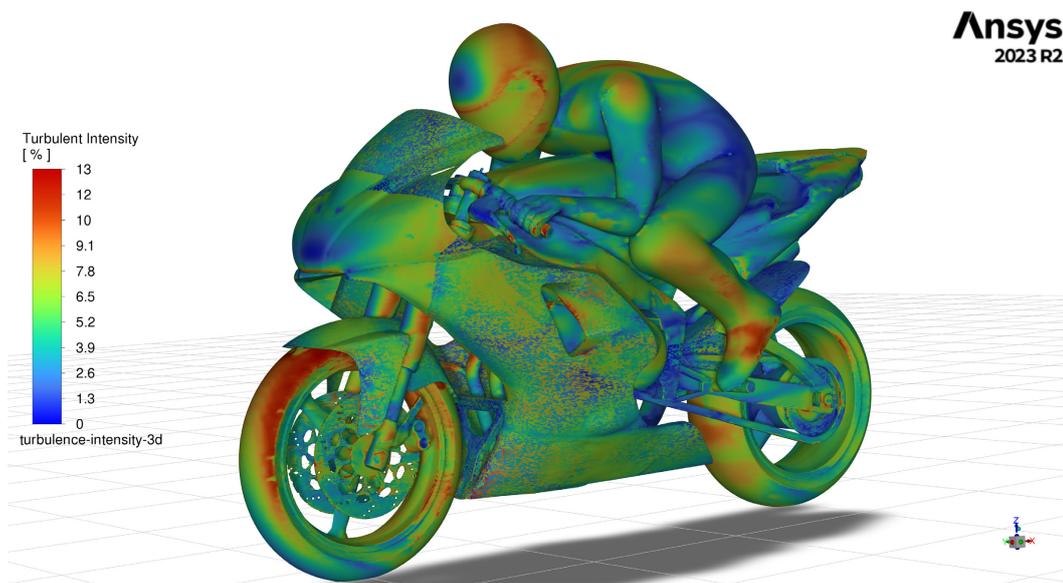


Figura 51: *Contour tridimensionale del modello Multi-5.*

Da quest'ultimo confronto si può notare che il modello Multi-5 presenta minori turbolenze soprattutto in prossimità delle mani, delle spalle e delle ginocchia del pilota, contribuendo a migliorare non solo le performance aerodinamiche della moto, ma anche fastidiose vibrazioni per il pilota.

Di seguito si riportano le schermate relative alle iterazioni del coefficiente di drag e di lift, limitando il range in un intervallo di valori interessante. La fluttuazione dei valori non è un fattore discriminante poiché è inevitabile ci sia ed è relativamente contenuta, perciò è possibile fare la media degli ultimi valori senza eccessiva perdita di accuratezza.

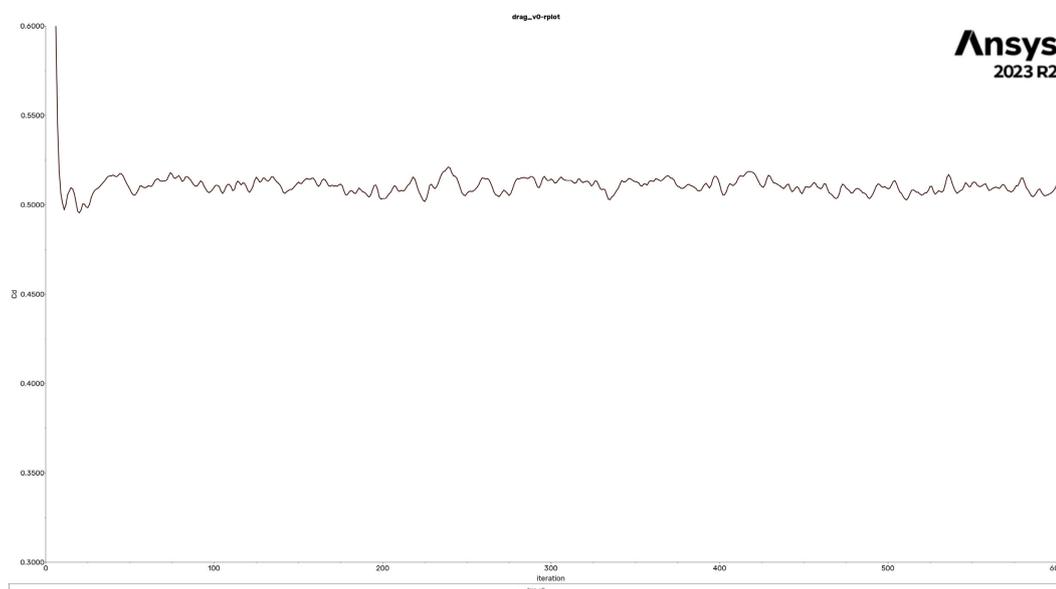


Figura 52: *Andamento del coefficiente di drag C_d nel modello Multi-5.*

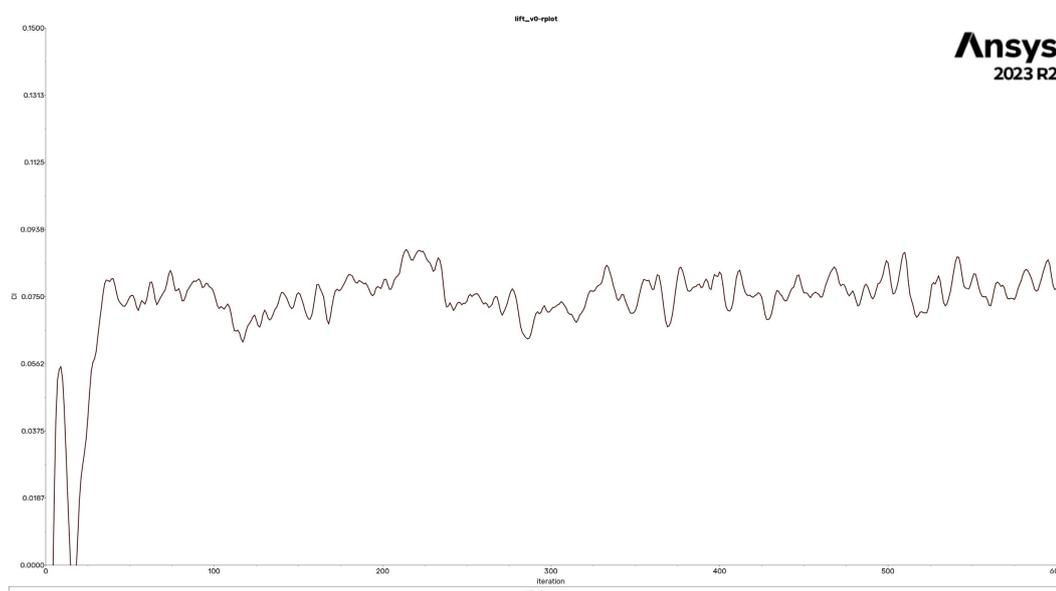


Figura 53: *Andamento del coefficiente di lift C_l nel modello Multi-5.*

4 Analisi dei risultati

4.1 Risultati finali e confronti con gli obiettivi di ottimizzazione

I valori di area (sezione frontale), di coefficiente di drag e di lift, e le forze aerodinamiche relative alle singole ottimizzazioni sono riportate nella seguente tabella:

Simulazione	Area [m^2]	C_d	C_l	F_d [N]	F_l [N]
Iniziale	0.6443	0.4900	0.0860	487.2254	85.5130
Ottimizzazione 1	0.6381	0.4973	0.0807	489.7514	79.4750
Ottimizzazione 2.1	0.6443	0.5026	0.0922	499.7731	91.6814
Ottimizzazione 2.2	0.6418	0.4717	0.1053	467.2327	104.3027
Ottimizzazione 3.1	0.6466	0.4909	0.0687	489.8727	68.5562
Ottimizzazione 3.2	0.6441	0.4849	0.0914	482.0266	90.8584
Ottimizzazione 4.1	0.6443	0.4912	0.0897	488.4186	89.1920
Ottimizzazione 4.2	0.6443	0.4880	0.0840	485.2367	83.5243
Ottimizzazione 5.1	0.6443	0.4890	0.0938	486.2311	93.2688
Ottimizzazione 5.2	0.6443	0.4851	0.0870	482.3532	86.5073

Con questi dati è possibile distinguere le modifiche che hanno portato un miglioramento nel coefficiente di drag e quelle che hanno ridotto il coefficiente di lift.

- **Coefficiente di drag C_d :** le modifiche più significative (espresse in ordine decrescente) sono state il restringimento della carena, la rotazione oraria della parte inferiore della carena, l'abbassamento del codino e infine il suo restringimento.
- **Coefficiente di lift C_l :** il contributo maggiore per abbassare il coefficiente di lift è stato dato dalla rotazione antioraria della parte inferiore della carena, poi l'abbassamento della posizione del casco e infine il restringimento del codino

È interessante notare come le modifiche relative alla rotazione della parte inferiore della carena porti a miglioramenti in entrambi i coefficienti in base al verso in cui si applica la rotazione, mentre il restringimento del codino porti benefici in entrambi i coefficienti.

Al contrario, l'allargamento del codino e l'allargamento della carena anteriore portano svantaggi sia in termini di resistenza aerodinamica sia di portanza,

risultando scelte meno interessanti per le geometrie e le condizioni del caso di studio.

Le restanti ottimizzazioni portano miglioramenti su uno dei due parametri, a discapito dell'altro.

Tuttavia l'incidenza delle modifiche sulle forze di resistenza all'avanzamento e di portanza rivelano delle variazioni piuttosto limitate nonostante la notevole velocità ipotizzata (che ricordiamo essere di 200 km/h). Questo è dovuto al fatto che le modifiche sono poco invasive se confrontate con le dimensioni caratteristiche delle superfici in questione.

Tuttavia, tra le modifiche effettuate, ce ne sono senza dubbio alcune più interessanti di altre, anche se questo non significa che ce ne siano da scartare a priori, poiché a parità di modello CFD, gli obiettivi di ottimizzazione potrebbero non essere sempre gli stessi.

Se si pensa alle caratteristiche profondamente differenti delle piste sulle quali le MotoGP gareggiano durante l'anno, appare evidente che uno studio di ottimizzazione effettuato per una specifica pista può risultare inadeguato per un'altra pista, pur mantenendo inalterati parametri come la potenza del motore o le regolazioni delle sospensioni.

Considerando che anche questi ultimi sono spesso oggetto di modifiche tra una gara e l'altra (spesso anche all'interno dello stesso week-end di gara), è ancora più importante definire accuratamente gli obiettivi di ottimizzazione e ponderare i vantaggi e gli svantaggi derivanti da una modifica aerodinamica della motocicletta.

4.2 Sviluppi futuri

In questo studio di ottimizzazione si è scelto di migliorare superfici simili a una MotoGP, al fine di dimostrare come le prestazioni della moto possano migliorare significativamente senza stravolgimenti sostanziali e senza l'aggiunta di ulteriori componenti.

Chiaramente non è stato possibile validare tutte le possibili combinazioni, ma si è scelto di utilizzare un criterio definito dal migliore risultato tra i due proposti a parità di modifica. Questo non significa che non ce ne siano altri altrettanto o perfino più validi.

In particolare si può pensare di utilizzare delle coperture che racchiudano i cerchi, rendendo le superfici in rotazione più continue, permettendo all'aria di essere meno disturbata dalla geometria del cerchio stesso per proseguire verso la parte posteriore della motocicletta.

Oppure si potrebbe approfondire l'impatto delle cosiddette "ali" sulla parte frontale della carenatura, che da qualche anno stanno comparando sempre più spesso sulle carenature delle MotoGP. Queste ali aiutano prevalentemente a generare deportanza sulla parte anteriore della moto, e a convogliare e controllare più efficacemente i flussi d'aria ai radiatori o verso la parte inferiore della carenatura.

Comunque è pienamente sostenibile un lavoro che non escluda il perfezionamento ulteriore della motocicletta, con l'aggiunta di appendici aerodinamiche, sempre che il nuovo modello non introduca nuovi indesiderati conflitti con le ottimizzazioni precedenti.

Riferimenti bibliografici

- [1] Barone Rosso. *Teoria dello strato limite*. URL: <https://www.baronerosso.it/>.
- [2] LEAP Australia. *Understanding the physics of boundary layers*. 11 Maggio 2020. URL: https://www.computationalfluidynamics.com.au/y-plus_part1_understanding-the-physics-of-boundary-layers/.
- [3] Motociclismo. *Guzzi 8 cilindri GP Story*. 11 Maggio 2017. URL: <https://www.motociclismo.it/moto-guzzi-8-cilindri-gp-500-1955-1957-foto-video-sound-tecnica-prestazioni-risultati-67587>.
- [4] David Blasco. *Royal Enfield's 1958 wind tunnel test a publicity stunt?* 18 Marzo 2016. URL: <https://www.royalenfields.com/2016/03/royal-enfields-1958-wind-tunnel-test.html>.
- [5] Motospot. *The Flying Doctor, Rodger Freeth, il visionario con le ali!* URL: <https://www.motospot-oldnews.com/it/single-post/the-flying-doctor-rodger-freeth-il-visionario-con-le-ali>.
- [6] BBC. *Mike Hailwood's 1979 TT-winning motorcycle restarted after repairs*. 20 Gennaio 2023. URL: <https://www.bbc.com/news/world-europe-isle-of-man-64333946>.
- [7] Corsedimoto. *MotoGP: scheda tecnica della Ducati Desmosedici GP11*. 12 Gennaio 2011. URL: <https://www.corsedimoto.com/motomondiale/motogp/motogp-scheda-tecnica-della-ducatti-desmosedici-gp11/>.
- [8] Matteo Nugnes. *MotoGP, Ducati: l'aerodinamica 2023 esordirà a Sepang*. 25 Gennaio 2023. URL: <https://it.motorsport.com/motogp/news/motogp-ducatti-aerodinamica-2023-sepang/10424485/>.
- [9] WorldSBK. *ANALISI TECNICA: l'aerodinamica e i nuovi metodi di sviluppo*. 30 Settembre 2021. URL: <https://www.worldsbk.com/it/notizie/2021/ANALISI%20TECNICA%20aerodinamica%20e%20i%20nuovi%20metodi%20di%20sviluppo>.
- [10] AlVolante. *Un secolo...ventoso*. 15 Aprile 2012. URL: https://www.alvolante.it/news/galleria_del_vento-635586.
- [11] AirShaper. *How to improve Motorcycle aerodynamics*. URL: https://airshaper.com/videos/motorcycle-aerodynamics/qrH_QB0rqbw.
- [12] Edwin N. Lightfoot R. Byron Bird Warren E. Stewart. *Transport Phenomena*. 2005. URL: https://it.wikipedia.org/wiki/Equazioni_di_Navier-Stokes.

- [13] Auteri Quartapelle. *Fluidodinamica comprimibile*. 2013. URL: https://it.wikipedia.org/wiki/Equazioni_di_Navier-Stokes.
- [14] Auteri Quartapelle. *Fluidodinamica incomprimibile*. 2013. URL: https://it.wikipedia.org/wiki/Equazioni_di_Navier-Stokes.
- [15] Wikipedia. *Equazioni di Navier-Stokes mediate*. 16 Giugno 2023. URL: https://it.wikipedia.org/wiki/Equazioni_di_Navier-Stokes_mediate.
- [16] Wilcox. *Turbulence Modeling for CFD*. 2006. URL: https://it.wikipedia.org/wiki/Modellazione_della_turbolenza.
- [17] Pope. *Turbulent Flows*. 2000. URL: https://it.wikipedia.org/wiki/Modellazione_della_turbolenza.
- [18] Cohen Dowling Kundu. *Fluid Mechanics*. 2011. URL: https://it.wikipedia.org/wiki/Modellazione_della_turbolenza.
- [19] RBF Morph. URL: <https://www.rbf-morph.com/>.