



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA
- Sede di Forlì -

CORSO DI LAUREA IN
INGEGNERIA AEROSPAZIALE
Classe L-9

ELABORATO FINALE DI LAUREA IN
ING-IND/06 FLUIDODINAMICA

STUDIO CFD DEL CONTROLLO DI SCIA DI UN CORPO TOZZO CON ATTUAZIONE AL BORDO D'ATTACCO

RELATORE

Prof. Guglielmo Minelli

CANDIDATO

Mattia Mallegni

Anno Accademico 2024/2025

Indice

Elenco delle Figure.....	3
Elenco delle Tabelle.....	5
Abstract.....	6
Introduzione.....	7
Metodologia.....	13
Risultati.....	20
Conclusioni.....	37
Appendice.....	38
Bibliografia.....	40

Elenco delle Figure

Figura 1. Effetto del boat-tailing sul coefficiente di resistenza Aerodinamica, [3] pp54.....	8
Figura 2. Esempio di un utilizzo di arrotondamento, [4] pp1126.....	8
Figura 3. Confronto corpo con e senza rugosità controllata, [4] pp1112.....	9
Figura 4. Vortex Generators, [7].....	9
Figura 5. Aspirazione e soffiaggio strato limite.....	10
Figura 6. (A)=schema della configurazione di base di un attuatore al plasma a scarica dielettrica [6] pp5, (B)=flusso indotto da un singolo attuatore al plasma operato in modalità continua (stazionaria), (C)=flusso indotto da un singolo attuatore al plasma operato in modalità a raffiche (instazionaria).....	11
Figura 7. Autoarticolato con superfici mobili, [3] pp55.....	11
Figura 8. Geometria utilizzata in [1].....	11
Figura 9. Geometrie usate nelle simulazioni.....	13
Figura 10. Dominio di simulazione.....	14
Figura 11. Mesh realizzata su Gmsh del corpo con aspect-ratio unitario.....	15
Figura 12. Mesh realizzata su Gmsh del corpo allungato.....	16
Figura 13. Schema descrittivo Attuazione.....	18
Figura 14. Grafico Cd e Cl, senza attuazione.....	20
Figura15. (A)= $\overline{U_x}/U_\infty$, (B)= $\overline{C_p}$ senza attuazione.....	21
Figura 16. Punti di estrazione dei profili di pressione/velocità.....	21
Figura 17. Cp sulla base del corpo, senza attuazione.....	22
Figura 18. Profili di velocità normalizzati, senza attuazione.....	22
Figura 19. Densità spettrale di potenza, senza attuazione.....	23
Figura 20. Grafico Cd e Cl, con attuazione.....	24
Figura 21. (A)= $\overline{U_x}/U_\infty$, (B)= $\overline{C_p}$ con attuazione.....	24
Figura 22. Variazione estensione scia, corpo con aspect-ratio unitario.....	25
Figura 23. Cp sulla base del corpo, con attuazione.....	25

Figura 24. Profili di velocità normalizzati, con attuazione.....	26
Figura 25. Densità spettrale di potenza, con attuazione.....	27
Figura 26. Grafico Cd e Cl corpo allungato, senza attuazione.....	28
Figura 27. (A)= $\overline{U_x}/U_\infty$, (B)= $\overline{C_p}$ con attuazione.....	29
Figura 28. Punti di estrazione dei profili di pressione/velocità corpo allungato.....	29
Figura 29. Profili di velocità normalizzati corpo allungato, senza attuazione.....	30
Figura 30. Cp sulla base del corpo allungato, senza attuazione.....	31
Figura 31. Densità spettrale di potenza corpo allungato.....	31
Figura 32. Grafico Cd e Cl corpo allungato, con attuazione.....	32
Figura 33. (A)= $\overline{U_x}/U_\infty$, (B)= $\overline{C_p}$ con attuazione.....	33
Figura 34. Variazione estensione scia, corpo allungato.....	33
Figura 35. Profili di velocità normalizzati corpo allungato, con attuazione.....	34
Figura 36. Cp sulla base del corpo allungato, con attuazione.....	35
Figura 37. Densità spettrale di potenza corpo allungato, con attuazione.....	35
Figura 38. Disposizione cartelle della simulazione.....	38

Elenco delle Tabelle

Tabella 1. Parametri di controllo della simulazione.....	17
Tabella 2. Valori Cd Medi.....	36

Abstract

Il presente lavoro di tesi, si è focalizzato sulla simulazione numerica e sull'analisi del controllo di scia applicato a un corpo tozzo bidimensionale, specificatamente un cilindro rettangolare con bordi d'attacco arrotondati.

In particolare questa attività di tesi si focalizza sul controllo attivo della scia di un corpo tozzo bidimensionale, tramite simulazioni numeriche (LES) in ambiente OpenFOAM. Lo studio di riferimento [1] propone una strategia di controllo innovativa basata su attuatori posizionati a monte, sul bordo d'attacco del corpo, pilotati da un segnale a multi-frequenza ottimizzato tramite algoritmi genetici. In questo elaborato in primo luogo viene implementato e analizzato il controllo attivo sul corpo tozzo di base (con aspect ratio unitario), validando la riduzione del coefficiente di resistenza medio (C_d) e studiando la risposta dinamica della scia tramite analisi in frequenza. Successivamente, viene investigata l'influenza della geometria del corpo sulla controllabilità del flusso, raddoppiando la lunghezza del corpo e analizzando i coefficienti C_d e C_l del nuovo caso non attuato. Infine, il controllo attivo viene applicato anche alla geometria allungata per valutarne l'efficacia in condizioni geometriche differenti.

La presente tesi si divide in più parti:

- Una parte introduttiva caratterizzata dall'attività di ricerca sull'argomento del controllo di scia
- La comprensione approfondita della metodologia numerica
- La descrizione della mesh con aspect ratio unitario
- Descrizione della mesh allungata
- La configurazione e l'esecuzione di simulazioni fluidodinamiche alle grandi scale (LES) con OpenFOAM, ad un numero di Reynolds (Re) di 40000
- Implementazione dell'attuazione
- Analisi in frequenza di entrambi i casi
- L'analisi dei risultati delle simulazioni

Introduzione

I corpi tozzi sono una classe di forme caratterizzate da dimensioni trasversali comparabili a quelle longitudinali (nella direzione del flusso). Questa geometria li distingue nettamente dai corpi aerodinamici, che sono invece progettati per minimizzare la resistenza attraverso forme affusolate. La comprensione dei fenomeni fluidodinamici che avvengono attorno ai corpi tozzi è di fondamentale importanza in numerosi ambiti dell'ingegneria, come ad esempio: la progettazione di veicoli (terrestri, aerei e sottomarini), di infrastrutture civili (come edifici e ponti) e persino applicazioni in ambito sportivo.

A differenza dei corpi aerodinamici, i corpi tozzi presentano una marcata separazione dello strato limite, che genera un'ampia scia e una zona di bassa pressione nella regione a valle. Questa configurazione di flusso è intrinsecamente legata a un'elevata resistenza di forma e dunque la capacità di controllare la scia prodotta dai corpi tozzi si traduce in benefici tangibili, come la riduzione della resistenza aerodinamica.

Quando un fluido scorre attorno a un corpo tozzo, si verifica la separazione dello strato limite a causa dei gradienti di pressione avversi, questa separazione crea un'ampia regione di flusso separato a valle del corpo. Per corpi cilindrici e altre forme tozze, la scia è spesso caratterizzata dal fenomeno del distacco di vortici (vortex shedding), ovvero un distacco periodico di vortici su larga scala da lati alterni del corpo. Questo schema di vortici è comunemente chiamato scia di von Kármán.

Le scie dei corpi tozzi sono comunemente associate a due problemi principali:

- **Aumento della Resistenza:** La regione di bassa pressione nella scia contribuisce in modo significativo ad incrementare la resistenza di forma, che rappresenta spesso la componente dominante della resistenza aerodinamica totale. Un'elevata resistenza aerodinamica implica un maggiore consumo energetico (ad esempio nei veicoli) e carichi maggiori sulle strutture.
- **Instabilità:** Il distacco di vortici può indurre forze aerodinamiche oscillanti sul corpo, che possono causare vibrazioni e potenziali danni strutturali, soprattutto se la frequenza di distacco si avvicina alla frequenza naturale di risonanza della struttura. Le forze oscillanti, generate dal distacco di vortici, possono portare a instabilità significative.

Il numero di Reynolds (Re) gioca un ruolo cruciale nel determinare le caratteristiche del flusso attorno ai corpi tozzi, influenzando il punto di separazione dello strato limite, la struttura della scia e il coefficiente di resistenza aerodinamica. I metodi di controllo del flusso devono quindi essere efficaci nell'intervallo di numeri di Reynolds di interesse per l'applicazione specifica, [2].

Il ritardo o il controllo della separazione dello strato limite permette di ridurre le dimensioni e l'intensità dei vortici, e questo può portare ad una riduzione della resistenza aerodinamica e delle instabilità associate.

Quando si parla di controllo di scia è bene distinguere i diversi metodi: controlli passivi e attivi (ad anello aperto o chiuso)

Controlli Passivi

Le tecniche passive di controllo della scia si basano su modifiche geometriche del corpo o sull'aggiunta di dispositivi che non richiedono apporto energetico esterno durante il loro funzionamento. Queste modifiche mirano ad alterare il flusso attorno al corpo, con l'obiettivo di ritardare la separazione dello strato limite, ridurre le dimensioni della scia o attenuare la formazione di vortici.

Una delle tecniche passive più comuni è la rastremazione (boat-tailing), vedi Fig.1. Questa tecnica consiste in una graduale riduzione della sezione trasversale del corpo nella parte posteriore. Tale modifica geometrica rende il profilo del corpo più affusolato, ritardando così la separazione del flusso e riducendo la resistenza. L'efficacia della rastremazione dipende fortemente dall'angolo e dalla lunghezza della rastremazione stessa: questi parametri devono essere accuratamente ottimizzati in funzione della geometria specifica del corpo e delle condizioni di flusso, [3].

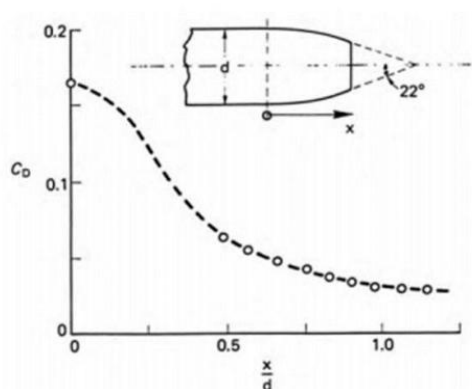


Figura 1. Effetto del boat-tailing sul coefficiente di resistenza Aerodinamica, [3]

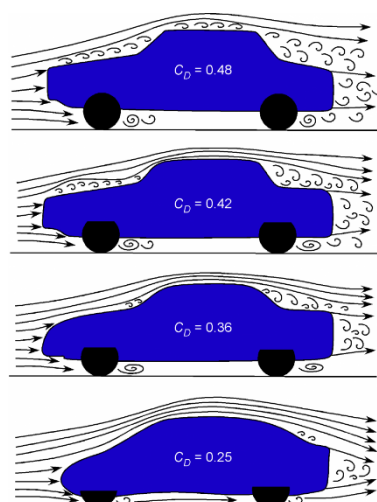


Figura 2. Esempio di un utilizzo di arrotondamento, [4]

Un'altra strategia passiva per il controllo della scia è l'arrotondamento degli spigoli vivi di un corpo tozzo. I corpi con spigoli vivi tendono a generare punti di separazione del flusso fissi e una resistenza aerodinamica maggiore rispetto a quelli con contorni più arrotondati. L'arrotondamento degli spigoli favorisce un flusso più uniforme attorno al corpo, riducendo la dimensione e l'intensità della scia. In particolare studi hanno dimostrato che arrotondare gli spigoli di un'automobile può ridurre significativamente la resistenza aerodinamica, potenzialmente anche dimezzandola (vedi Fig.2), con un conseguente miglioramento dell'efficienza del consumo di carburante, [4].

Le modifiche superficiali, come l'introduzione di rugosità controllata (ad esempio, le fossette sulle palline da golf, vedi Fig.3), rappresentano un ulteriore approccio passivo per la manipolazione della scia. In alcuni casi, l'introduzione di una rugosità superficiale opportunamente progettata può indurre la transizione dello strato limite da laminare a turbolento. Questo strato limite turbolento, paradossalmente, può ritardare la separazione del flusso e ridurre la resistenza aerodinamica. Uno strato limite turbolento infatti, grazie a un maggiore scambio di quantità di moto vicino alla parete, è in grado di resistere a gradienti di pressione avversi più elevati, e quindi, tende a separarsi più a valle rispetto a uno strato limite laminare. Questa separazione ritardata si traduce in una scia più stretta e una regione di bassa pressione meno estesa, con una conseguente riduzione della resistenza, [4].

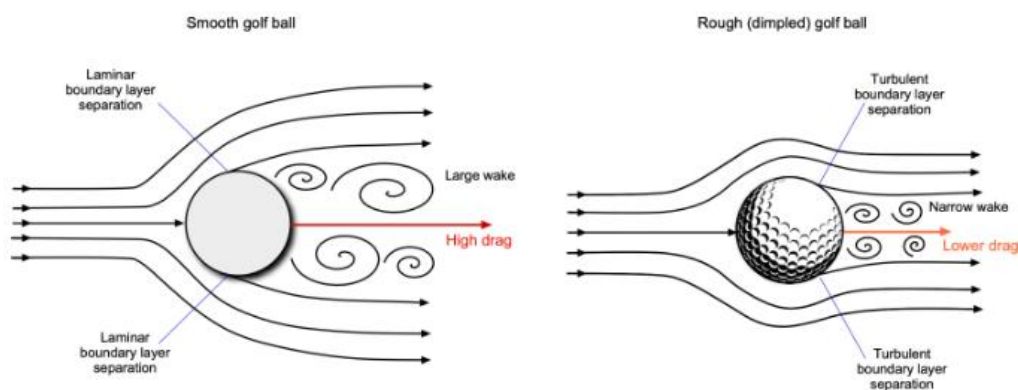


Figura 3. Confronto corpo con e senza rugosità controllata, [4]

I generatori di vortici (Vortex Generators) sono piccoli dispositivi aerodinamici, solitamente alette, posizionati sulla superficie di un corpo (vedi Fig.4). Il loro scopo è quello di generare vortici longitudinali. Questi vortici energizzano lo strato limite, mescolando lo strato di fluido più lento vicino alla superficie (dove l'attrito con la parete rallenta il flusso) con il flusso più veloce presente negli strati esterni. Questo processo aumenta la capacità dello strato limite di resistere alla separazione, ritardandola e contribuendo alla riduzione della resistenza, [5].

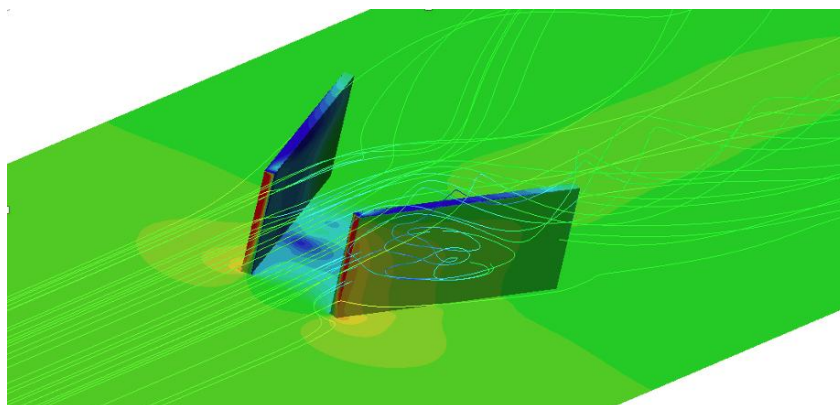


Figura 4. Vortex Generators, [7]

Controlli Attivi

A differenza dei metodi passivi, il controllo attivo della scia richiede un apporto energetico esterno per modificare il flusso attorno a un corpo. Questo approccio offre un controllo più preciso e la possibilità di adattare l'intervento in base alle condizioni del flusso. Esistono due categorie principali di controllo attivo: ad anello aperto (open-loop) e ad anello chiuso (closed-loop). Nel controllo ad anello aperto, gli attuatori sono comandati da segnali predefiniti, senza alcun feedback dal flusso. Sebbene sia più semplice da implementare, questo metodo può risultare meno efficace in presenza di disturbi esterni o variazioni operative, poiché non è in grado di adattarsi in tempo reale alle variazioni del flusso. A differenza del controllo ad anello aperto, il controllo attivo ad anello chiuso (o reattivo) utilizza sensori per monitorare il flusso e un sistema di feedback per regolare l'azione degli attuatori. Questo approccio, basato sulle misurazioni effettuate, permette al sistema di adattarsi dinamicamente alle variazioni del flusso e di ottimizzare le prestazioni in tempo reale, [2].

Aspirazione e Soffiaggio

Tra le tecniche attive per il controllo della scia, l'aspirazione e il soffiaggio dello strato limite sono tra le più diffuse. Il soffiaggio viene utilizzato per energizzare lo strato limite, aumentando la sua capacità penetrativa in gradienti di pressione avversi, mentre l'aspirazione consente di ridurre lo spessore dello strato limite stesso (vedi Fig.5). L'approccio combinato è molto utile per la modifica della struttura della scia e per la riduzione della resistenza.

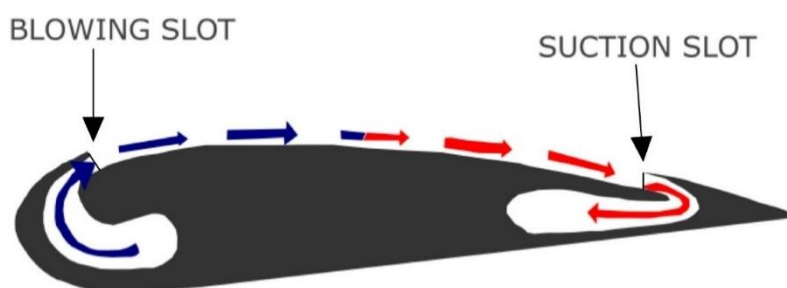


Figura 5. Aspirazione e soffiaggio strato limite

Attuatori al Plasma

Gli attuatori al plasma rappresentano una tecnologia innovativa nel campo del controllo attivo del flusso. Questi dispositivi sfruttano scariche elettriche per generare perturbazioni localizzate nell'aria adiacente, modificando così il campo di flusso complessivo attorno al corpo tozzo.

Un vantaggio significativo degli attuatori al plasma è l'assenza di parti meccaniche mobili (vedi Fig.6), il che li rende potenzialmente più affidabili e meno complessi rispetto ad altri sistemi attivi. Questi attuatori trovano applicazione nel controllo della transizione dello strato limite da laminare a turbolento e favoriscono il riattacco di flussi separati, in modo tale da ridurre la resistenza aerodinamica. La diminuzione della resistenza ottenibile con questi attuatori varia in funzione della configurazione, dei parametri operativi e delle condizioni di flusso. In determinate circostanze operative, attuatori al plasma collocati sugli spigoli arrotondati di un corpo tozzo Ahmed, hanno determinato una riduzione della resistenza significativa, come descritto in [6].

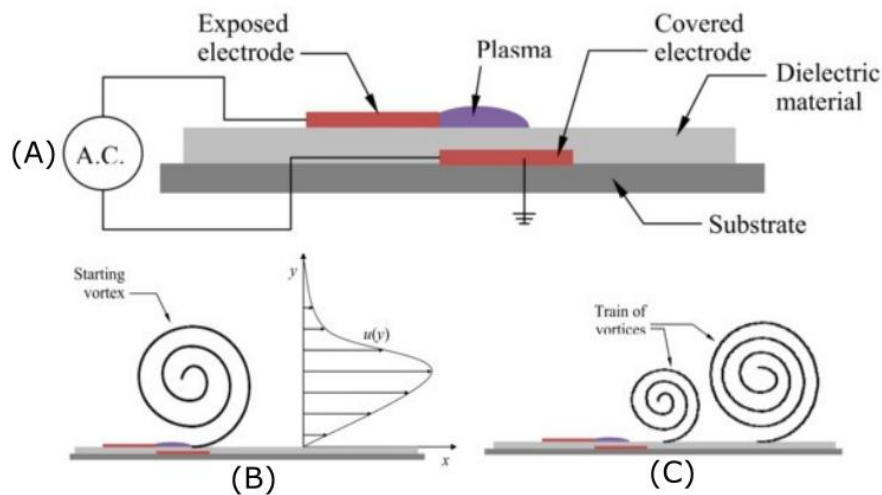


Figura 6. (A)=schema della configurazione di base di un attuttore al plasma a scarica dielettrica, [6]
 (B)=flusso indotto da un singolo attuttore al plasma operato in modalità continua (stazionaria)
 (C)=flusso indotto da un singolo attuttore al plasma operato in modalità a raffiche (instazionaria)

Superfici Mobili

Un'ulteriore strategia attiva per il controllo della scia consiste nell'utilizzo di superfici mobili, come flap, alette o cilindri rotanti, applicate sulla superficie di un corpo tozzo, vedi Fig.7.

La movimentazione di queste superfici è in grado di modificare lo strato limite e di posticipare la separazione del flusso, portando a una conseguente diminuzione della resistenza aerodinamica, [3].

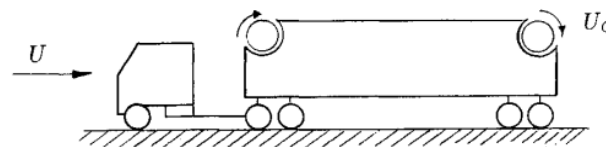


Figura 7. Autoarticolato con superfici mobili, [3]

Il Lavoro di Minelli et al. (2020)

Il principale riferimento metodologico e scientifico che ha guidato questa attività di tesi è stato [1]. Questo studio investiga l'efficacia di un'attuazione applicata sui bordi d'attacco arrotondati di un cilindro rettangolare, con l'obiettivo di ridurre la resistenza aerodinamica. Per analizzare il complesso flusso turbolento attorno al corpo, gli autori hanno impiegato sofisticate Simulazioni alle Grandi Scale (LES). La geometria specifica presa in esame è un cilindro a sezione quadrata (con lato $D=1$), caratterizzato da bordi d'attacco anteriori arrotondati con un raggio $r = 0.05D$, vedi Fig.8. Le simulazioni numeriche descritte nel paper sono state condotte ad un numero di Reynolds $Re=40000$, un regime di flusso in cui la scia è tipicamente caratterizzata da fenomeni turbolenti e instazionari.

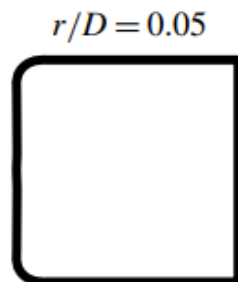


Figura 8. Geometria utilizzata in [1]

La strategia di controllo utilizzata si basa sull'impiego di getti fluidi pulsati, emessi da sottili fessure posizionate simmetricamente sui due bordi d'attacco arrotondati del cilindro. È stato utilizzato inoltre un algoritmo genetico (GA) per ottimizzare i parametri del segnale di attuazione (frequenze e ampiezze), con il fine ultimo di minimizzare il coefficiente di resistenza medio.

Obbiettivi

L'obiettivo di questo elaborato è descritto nei seguenti punti chiave:

- Implementazione del Controllo Attivo: Applicare la strategia di attuazione a monte descritta nello studio di riferimento [1] al modello di base e analizzarne gli effetti sulla riduzione della resistenza e sulla dinamica della scia.
- Analisi in Frequenza: Introdurre un'analisi di post-processing basata sulla Trasformata Rapida di Fourier (FFT) per studiare il comportamento oscillatorio della scia, calcolare il Numero di Strouhal e validare il fenomeno fisico del distacco dei vortici.
- Investigazione dell'Effetto Geometrico: Modificare la geometria del corpo raddoppiandone la lunghezza, per studiare come un diverso aspect-ratio influenzi il Cd e il Cl.
- Valutazione dell'Efficacia del Controllo sul Corpo Allungato: applicare la medesima strategia di controllo attivo alla nuova geometria per determinare se la sua efficacia sia mantenuta o alterata.

Attraverso questo percorso viene fornita una caratterizzazione completa del controllo di scia, validandone i risultati e investigandone la robustezza al variare delle condizioni geometriche.

Metodologia

Per replicare questo studio l'attività di simulazione si è avvalsa interamente di software open-source:

OpenFOAM.org Versione 12: Utilizzato come solutore CFD per eseguire le simulazioni LES. La sua struttura modulare e la vasta gamma di modelli disponibili lo rendono uno strumento versatile per la ricerca accademica.

Gmsh: Impiegato per la generazione della mesh computazionale 2D, permettendo un controllo dettagliato sulla discretizzazione del dominio e sull'infittimento della griglia nelle regioni di interesse.

Python: Utilizzato per il post-processing dei dati (es. lettura e plot dei coefficienti di forza).

ParaView: Utilizzato per la visualizzazione e l'analisi qualitativa dei campi di flusso risultanti dalle simulazioni.

Come anticipato precedentemente, i corpi studiati sono 2:

- un cilindro a sezione quadrata avente lati con lunghezza pari a $D=1\text{m}$, e bordi d'attacco anteriori arrotondati con raggio $r=0.05D$.
- un cilindro a sezione rettangolare avente un'altezza pari a $D=1\text{m}$ e una lunghezza pari a $2D$, anche in questo caso vi sono i due bordi d'attacco anteriori arrotondati con raggio $r=0.05D$, vedi Fig.9

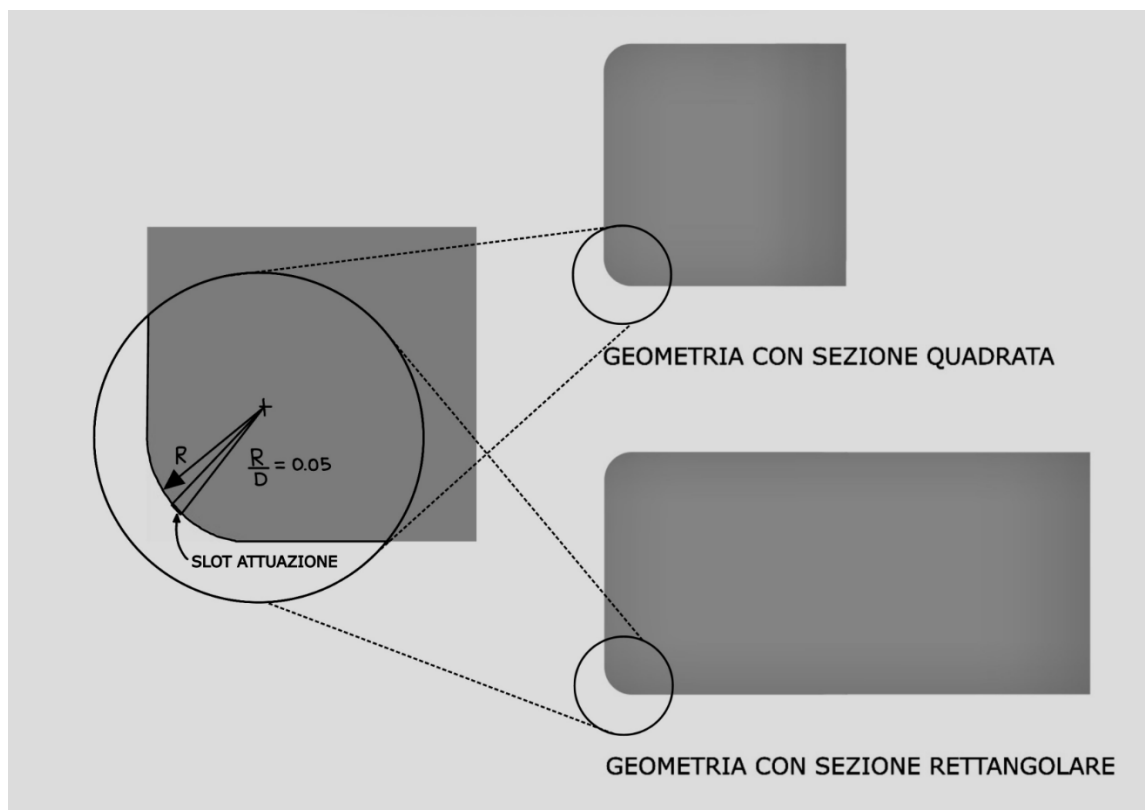


Figura 9. Geometrie usate nelle simulazioni

In entrambi i casi il dominio computazionale è stato dimensionato estendendosi per $6D$ a monte, $25D$ a valle e con una semi-altezza di $10.5D$, vedi Fig.10

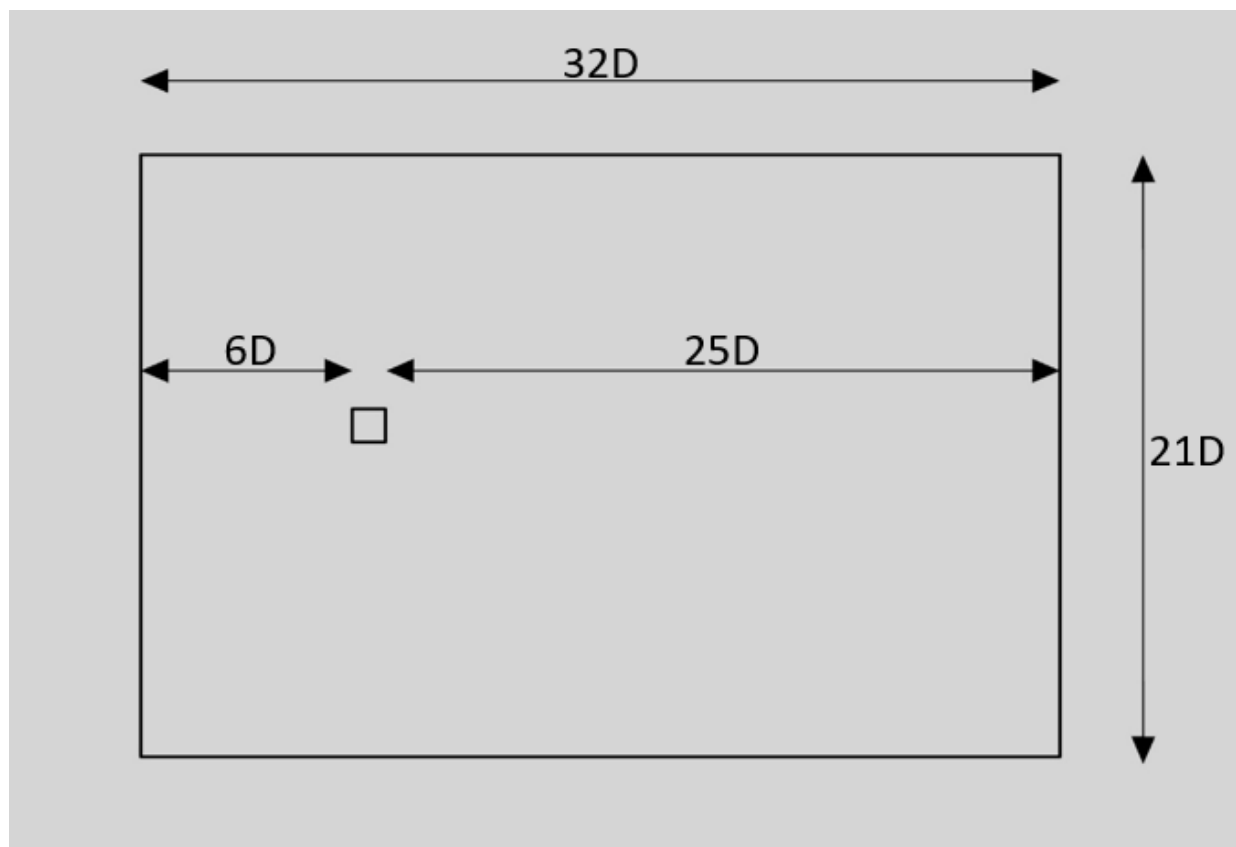


Figura 10. Dominio di simulazione

Per la generazione delle mesh, è stato impiegato il software Gmsh, con il quale è stato sviluppato uno script dedicato (.geo), vedi appendice e repository all'indirizzo: <https://github.com/guglielmo-minelli-unibo/Studio-CFD-del-controllo-di-scia-di-un-corpo-tozzo-con-attuazione-al-bordo-d-attacco>.

Questo ha permesso di creare mesh bidimensionali con struttura a blocchi (Fig.11 e Fig.12), prestando particolare attenzione all'infittimento della griglia nelle zone di maggiore interesse fluidodinamico: vicino alle superfici del corpo e specialmente in prossimità degli slot di attuazione. Tale infittimento è cruciale per catturare accuratamente i ripidi gradienti di velocità e la fisica dello strato limite

Successivamente entrambe le mesh (una per ogni geometria) sono state convertite su OpenFOAM tramite il comando `gambitToFoam`, e sono state verificate con l'utility `checkMesh`, che è uno strumento utilizzato per analizzare e valutare la qualità e la validità della mesh stessa.

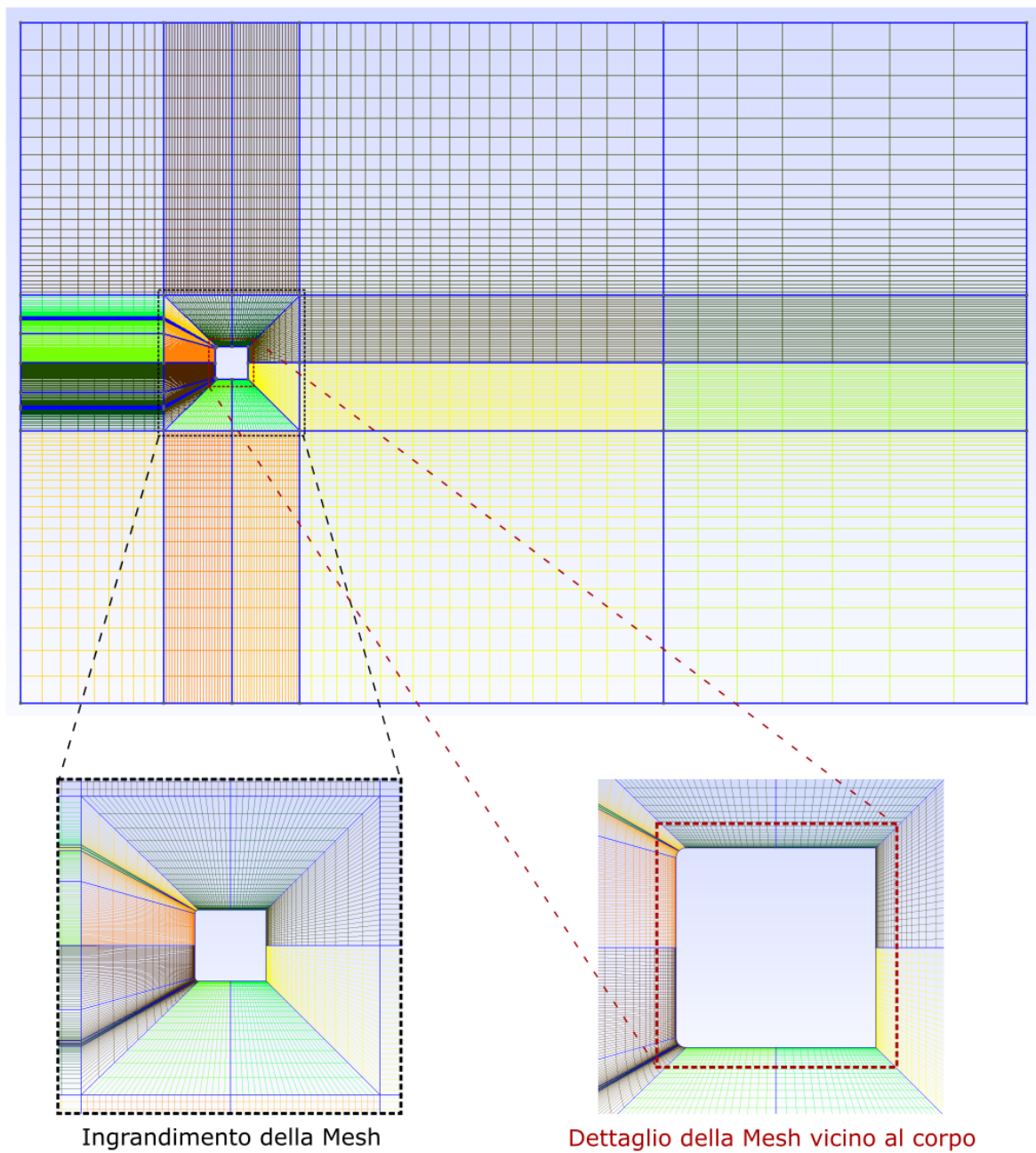


Figura 11. Mesh realizzata su Gmsh del corpo con aspect-ratio unitario

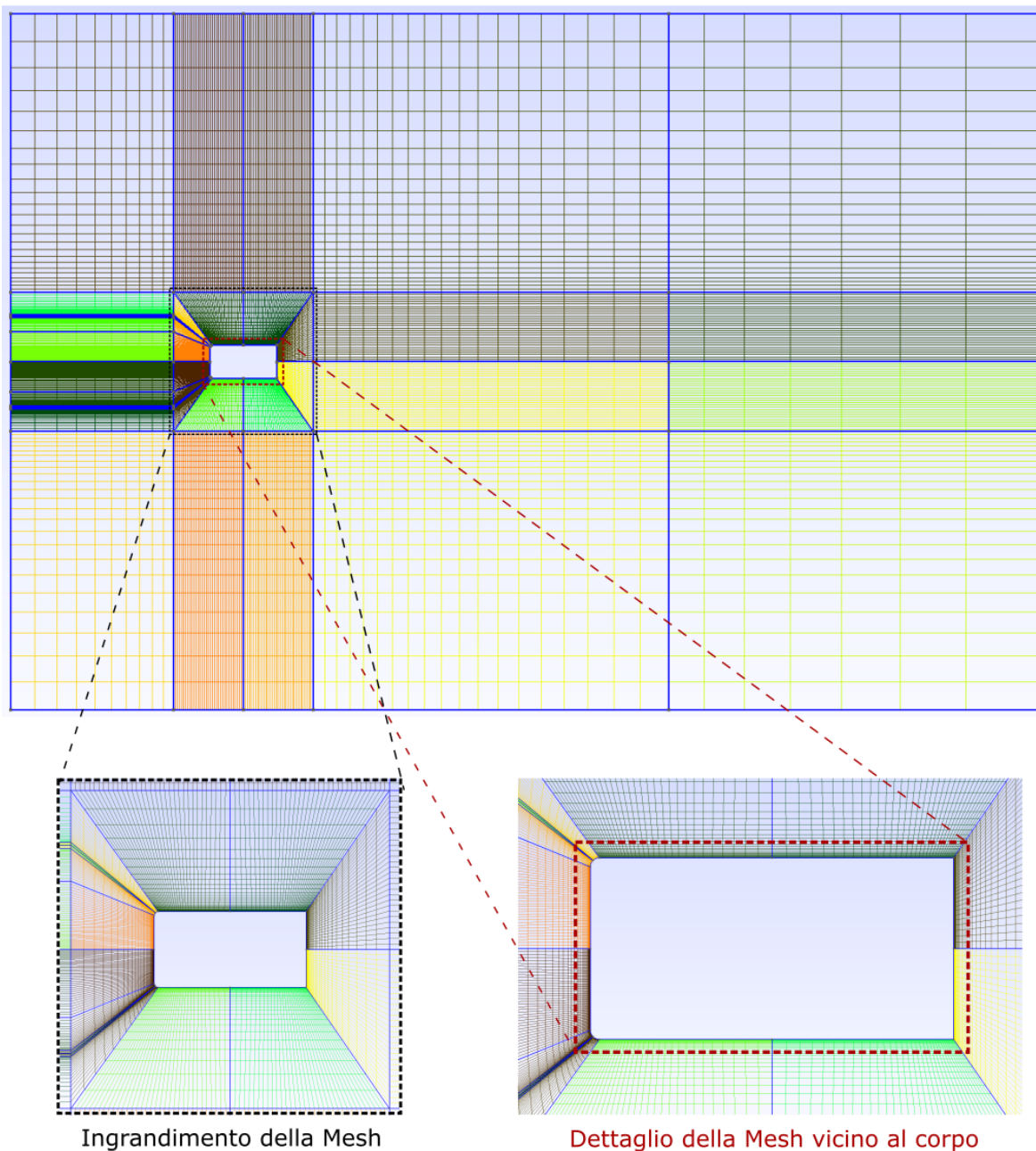


Figura 12. Mesh realizzata su Gmsh del corpo allungato

Una volta ottenute le mesh, si è proceduto alla configurazione del caso di flusso non attuoato.

Modello di Turbolenza e Solutore: È stato selezionato `simulationType LES` con `LESModel WALE` in `constant/turbulenceProperties` (file necessario per definire il modello di turbolenza). Il solutore `pimpleFoam` è stato utilizzato per risolvere le equazioni di Navier-Stokes incomprimibili.

Proprietà del Fluido e Numero di Reynolds: In `constant/transportProperties` (file utilizzato per descrivere le proprietà di trasporto del fluido), la viscosità cinematica `nu` è stata impostata a $1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ per ottenere, con una velocità di ingresso $U_{\infty}=0.4 \text{ m/s}$, il numero di Reynolds pari a 40000.

Durata della simulazione: Il passo temporale `deltaT` è stato fissato a 0.0005s per mantenere un numero di CFL basso (<1) e la durata della simulazione è stata impostata a 525s (160s di transitorio e 365s di averaging), corrispondenti a 6.6 volte il tempo di passaggio di una particella fluida nel dominio di simulazione.

Funzioni di Post-Processing: Nel controlDict (file necessario per definire le impostazioni generali della simulazione) sono state configurate diverse funzioni, tra cui:

- **forceCoeffs:** questa funzione calcola i valori del Cd e Cl

- **fieldAverage:** per calcolare le medie temporali dei campi di flusso
- **yPlus:** che serve per valutare l'infittimento della mesh nella zona vicino alla superficie. Un valore di yPlus sufficientemente basso (1) garantisce che la prima cella della mesh si trovi abbastanza vicino alla parete, in modo tale da "vedere i dettagli" del flusso viscoso, condizione essenziale per garantire l'accuratezza della simulazione
- **xPlus:** analogamente, **xPlus** descrive la discretizzazione della mesh lungo la direzione del flusso. È un parametro importante per controllare l'aspect ratio delle celle a parete, evitando che un allungamento eccessivo ($\Delta x/\Delta y$ elevato) comprometta la stabilità numerica. A differenza di y+, il valore di x+ non è stato calcolato da una funzione del solutore, ma è stato stimato in fase di post-processing. Nello specifico, si è proceduto ispezionando la mesh e misurando le dimensioni di un campione rappresentativo di celle a parete. Applicando la relazione $x+ \approx \Delta x/\Delta y$ (valida per $y+ \approx 1$), si è ottenuto un valore medio di circa 20.

I parametri di controllo sopracitati, sono stati riportati nella Tabella 1

Parametro	Valore medio	Valore massimo
CFL	< 1	2.5
Y+	1	6
X+	20	120

Tabella 1. Parametri di controllo della simulazione

Partendo da questo solido setup di base, è stata implementata la strategia di controllo attivo del flusso descritta in [1]. La strategia di controllo implementata, nota come attuazione a monte (upstream actuation), si basa su un principio fisico differente rispetto agli approcci tradizionali, i quali agiscono direttamente sulla scia a valle del corpo. L'idea alla base è che risulti energeticamente più efficiente manipolare il flusso in una regione dove è ancora stabile e poco turbolento, ovvero lo strato limite che si sviluppa sulla superficie anteriore del corpo, piuttosto che contrastare i vortici già formati e altamente energetici nella scia, [1]. Il successo di questa strategia risiede non solo nel posizionamento strategico degli attuatori sui bordi d'attacco arrotondati, ma soprattutto nella natura del segnale che li pilota. Lo studio [1] ha infatti scoperto, tramite un processo di ottimizzazione, che il segnale più efficace è una sovrapposizione di due frequenze specifiche, descritta dalla formula $U_{afc}(t) = A_1 \sin(2\pi f_1 t) + A_2 \sin(2\pi f_2 t)$. I parametri di questa equazione sono strettamente legati alla fisica del flusso: le frequenze ottimali (f_1 , f_2) sono le superarmoniche della frequenza naturale di distacco dei vortici (F_s), le ampiezze (A_1 , A_2) sono anch'esse diverse.

Per tradurre questo concetto nella simulazione, è stato necessario dimensionalizzare i parametri ottimali forniti da [1] in forma adimensionale. Lo studio [1] identifica il caso a più alta riduzione di resistenza (definito GDR, Global Drag Reduction) con i seguenti valori adimensionali:

- **Frequenze normalizzate:** $F1+ = f_1 D/U_\infty = 0.42$ e $F2+ = f_2 D/U_\infty = 0.63$.
- **Ampiezze normalizzate:** $A1+ = A_1/U_\infty = 0.45$ e $A2+ = A_2/U_\infty = 0.04$.

Questi valori mostrano che le frequenze ottimali sono la seconda e la terza armonica della frequenza dei vortici di distacco dello shear layer ($F_s+ = 0.21$) e che l'ampiezza della prima componente è di un ordine di grandezza maggiore rispetto alla seconda.

Considerando i parametri della presente simulazione, ovvero una velocità del flusso indisturbato $U_\infty = 0.4$ m/s e una dimensione caratteristica $D = 1$ m, i parametri dimensionali del segnale di attuazione sono stati impostati come segue:

- **Ampiezze dimensionali:**
 $A1 = A1+ \cdot U_\infty = 0.45 \cdot U_\infty = 0.18$ m/s

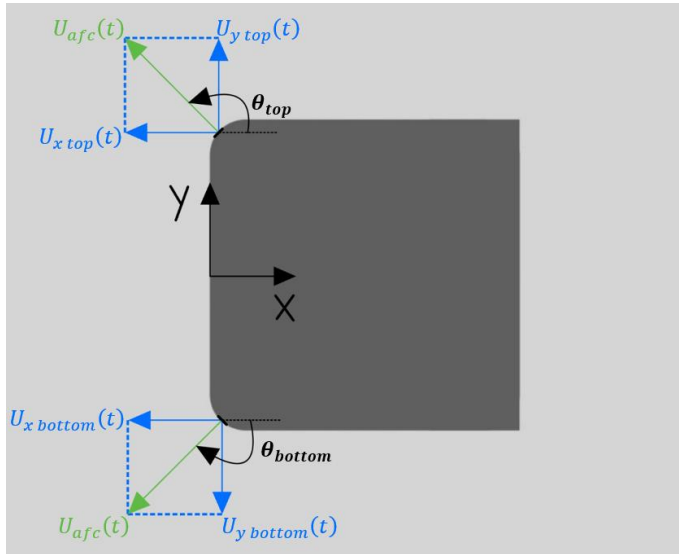
$$A2=A2+U_{\infty}=0.04 \cdot U_{\infty}=0.016 \text{ m/s}$$

- **Frequenze dimensionali:**

$$f1=F1+U_{\infty}/D=0.42 \cdot U_{\infty}/D=0.168 \text{ Hz}$$

$$f2=F2+U_{\infty}/D=0.63 \cdot U_{\infty}/D=0.252 \text{ Hz}$$

Nel presente lavoro di tesi, questo concetto è stato tradotto in una precisa implementazione tecnica: uno script Python, 'genera_attuazione_csv.py'. Il cuore dell'implementazione del controllo attivo risiede nell'interazione tra uno script di pre-processing esterno e una specifica condizione al contorno all'interno del solutore. Il processo inizia con lo script Python 'genera_attuazione_csv.py', il quale agisce come un generatore di segnale intelligente. Questo script traduce la strategia di controllo fisico in dati numerici direttamente utilizzabili da OpenFOAM, per farlo utilizza il segnale descritto precedentemente $U_{afc}(t)=A1\sin(2\pi f1t)+A2\sin(2\pi f2t)$ (con le frequenze e le ampiezze delle 2 sinusoidi dimensionalizzate) e lo discretizza. Lo script genera quindi un segnale temporale discreto, $U_{afc}(t)$, che copre l'intera durata della simulazione con lo stesso passo temporale (deltaT). Poiché il getto viene emesso in direzione perpendicolare rispetto alla superficie degli slot di attuazione (vedi Fig.13), il segnale $U_{afc}(t)$ viene scomposto nelle sue componenti U_x e U_y . L'output finale dello script è la creazione di due file di testo in formato .csv, uno per ogni slot di attuazione, contenenti una tabella a due colonne: la prima colonna elenca gli istanti di tempo, la seconda il corrispondente vettore di velocità (U_x U_y 0).



$$\begin{cases} \theta_{top} = 180^\circ - 45^\circ = 135^\circ \\ \theta_{bottom} = -180^\circ + 45^\circ = -135^\circ \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_{x \text{ top}}(t) = U_{afc}(t) \cdot \cos(\theta_{top}) \\ U_{y \text{ top}}(t) = U_{afc}(t) \cdot \sin(\theta_{top}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_{x \text{ bottom}}(t) = U_{afc}(t) \cdot \cos(\theta_{bottom}) \\ U_{y \text{ bottom}}(t) = U_{afc}(t) \cdot \sin(\theta_{bottom}) \end{cases}$$

Figura 13. Schema descrittivo Attuazione

A questo punto interviene la condizione al contorno timeVaryingMappedFixedValue, definita nel file 0/U per le patch della mesh corrispondenti agli slot. Questa funzione agisce come un "lettore" che sincronizza il segnale esterno con la simulazione. Durante l'esecuzione, ad ogni singolo passo temporale, OpenFOAM consulta il file .csv specificato per quella patch, cerca l'istante di tempo corrente nella prima colonna e legge le due componenti del vettore velocità associato dalla seconda colonna. Questo vettore viene quindi imposto come una condizione di Dirichlet (FixedValue) sulla patch, facendo sì che le celle del bordo abbiano esattamente quella velocità per quell'istante. L'interazione continua tra lo script che scrive i dati e la condizione al contorno che li legge e li applica si traduce in un getto pulsato, preciso e variabile nel tempo, che inietta nel dominio computazionale la perturbazione a multifrequenza necessaria per manipolare la dinamica della scia.

Infine, per analizzare in modo approfondito la dinamica del flusso, è stata introdotta un'importante tecnica di post-processing: l'analisi in frequenza. In fluidodinamica, i segnali acquisiti da simulazioni non stazionarie, come le forze aerodinamiche, sono spesso composti da una sovrapposizione di molteplici modi oscillatori. L'analisi in frequenza è un procedimento matematico che permette di scomporre un segnale dal dominio del tempo a quello della frequenza, al fine di identificare le frequenze dominanti e l'energia a esse associata, [1]. Per realizzare questa trasformazione è stato utilizzato lo script 'Python fft_corretto1.py', il quale implementa l'algoritmo della Trasformata Veloce di Fourier (FFT). Lo script opera leggendo la serie storica del coefficiente di portanza (Cl), un indicatore diretto dell'oscillazione della scia, e calcola la Densità Spettrale di Potenza (PSD). Il risultato è un grafico che mostra la distribuzione dell'energia del segnale attraverso lo spettro delle frequenze, dove i picchi indicano le pulsazioni caratteristiche del sistema. Ottenendo quindi i picchi di frequenza (f), è stato possibile calcolare il Numero di Strouhal ($St=f \cdot D/U_\infty$). Inoltre analizzando i casi attuati, è stato possibile verificare se il picco di frequenza naturale della scia venisse soppresso e se, al suo posto, emergessero nuovi picchi energetici esattamente in corrispondenza delle frequenze imposte dall'attuazione. Questa osservazione, nota come fenomeno di "lock-in", rappresenta la prova quantitativa che il controllo a monte sta effettivamente dominando e riorganizzando la dinamica dell'intera scia, [1].

In totale sono state eseguite 4 simulazioni:

- corpo con aspect-ratio unitario senza attuazione
- corpo con aspect-ratio unitario con attuazione
- corpo allungato senza attuazione
- corpo allungato con attuazione

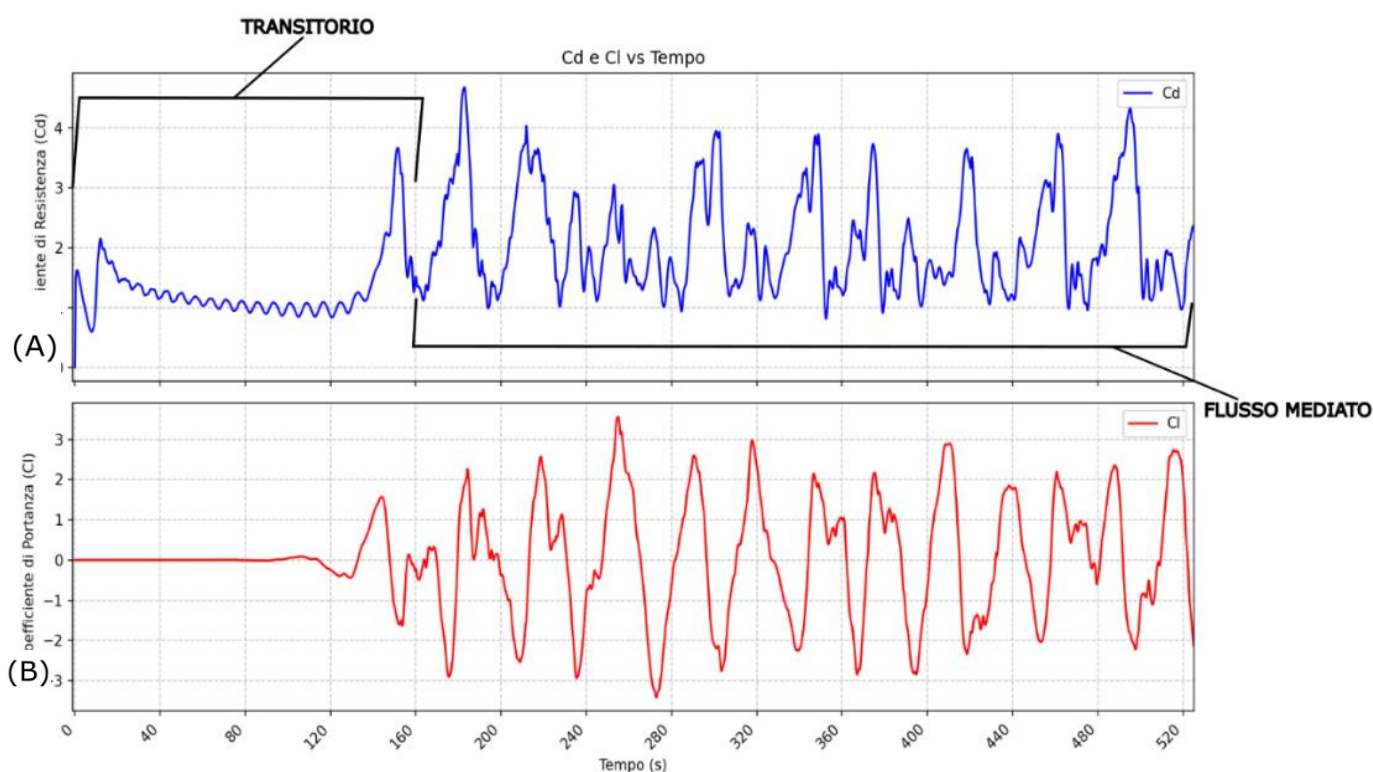
e per ognuna di queste simulazioni sono stati raccolti e analizzati i dati forniti dalle funzioni citate precedentemente.

Risultati

L'analisi dei risultati è stata condotta in modo sistematico e comparativo, partendo dalla caratterizzazione del flusso di base per il corpo con aspect-ratio unitario fino alla valutazione dell'efficacia del controllo sulla geometria modificata. Questo capitolo presenta e discute i dati quantitativi e qualitativi ottenuti dalle quattro simulazioni, con l'obiettivo di validare il modello, comprendere i meccanismi di controllo e investigarne la robustezza.

Analisi del corpo con aspect-ratio unitario ($L/D=1$)

Il primo passo fondamentale della ricerca è consistito nell'analisi dettagliata della configurazione di base, con aspect-ratio unitario, sia in condizioni di flusso naturale (non attuato) che sotto l'effetto del controllo attivo. Si è analizzato in primo luogo il caso non attuato, per comprendere l'evoluzione naturale della scia e determinare la durata del transitorio, dopo il quale inizia il fenomeno del vortex-shedding. La durata del transitorio iniziale si è quantificata tramite l'andamento temporale dei coefficienti di forza, che mostra il comportamento tipico di un flusso instabile caratterizzato dal fenomeno del vortex shedding.



(A)=Cd vs Tempo (B)=Cl vs Tempo
Figura 14. Grafico Cd e Cl, senza attuazione

Dalla Fig.14 si evince che dopo un transitorio iniziale di circa 160s, il coefficiente di resistenza (C_d) si assesta attorno a un valore medio di circa $C_d=2.5$, mentre il coefficiente di portanza (C_l) esegue ampie oscillazioni periodiche, indicative della formazione della scia di von Kármán.

Un altro aspetto importante è stato ottenere i campi di velocità e il $\overline{C_p}$ medio (Fig.15), tramite la funzione 'fieldAverage', quest'ultima effettua una media a partire dal time step 160s (in modo tale da escludere il transitorio della simulazione). Questi campi medi sono stati utilizzati per

estrarre poi i profili di pressione e velocità medi, in diversi punti della scia.

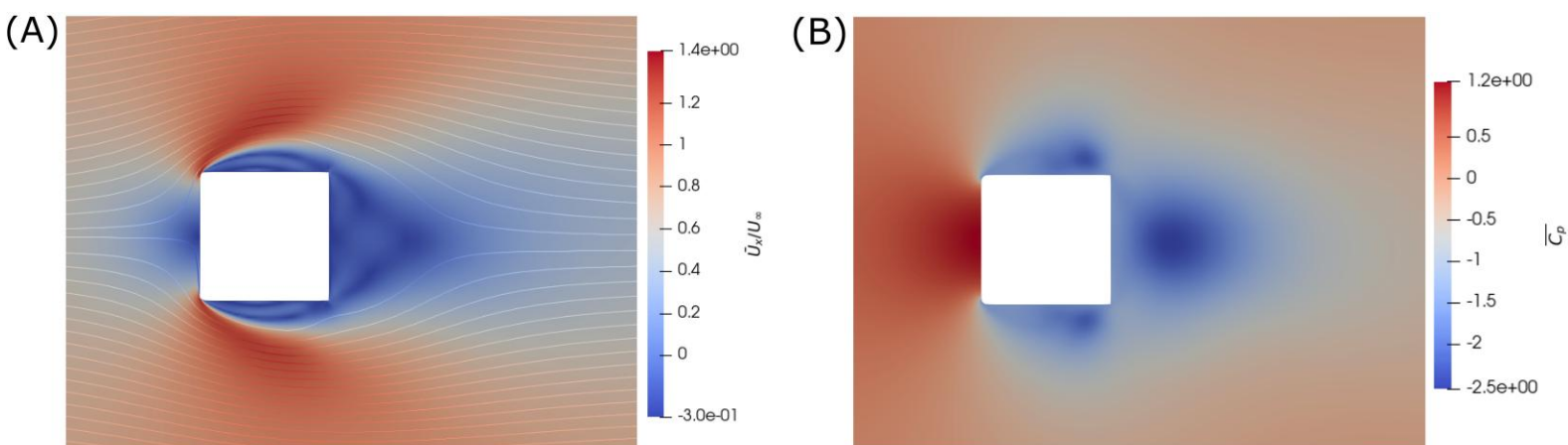


Figura 15. (A)= $\overline{U_x}/U_\infty$, (B)= $\overline{C_p}$ senza attuazione

Il campo di velocità medio utilizzato è un campo di velocità longitudinale normalizzato con la U_∞ [Fig.15 (A)], questo mostra chiaramente la regione di scia a bassa velocità che si estende a valle del corpo, caratterizzata da una bolla di ricircolazione immediatamente dietro la base.

Allo stesso tempo, il $\overline{C_p}$ medio [Fig.15 (B)] evidenzia una zona di bassa pressione sulla faccia posteriore, che è la causa principale della resistenza aerodinamica.

Per analizzare meglio la scia sono stati estratti dei profili di pressione e velocità in diversi punti di quest'ultima, creando dei grafici. Questi ultimi permettono di visualizzare e quantificare la distribuzione di quantità di moto e di pressione nella scia, potendo poi creare un paragone con il caso attuato.

I profili sono stati estratti nei seguenti punti del corpo (vedi Fig.16):

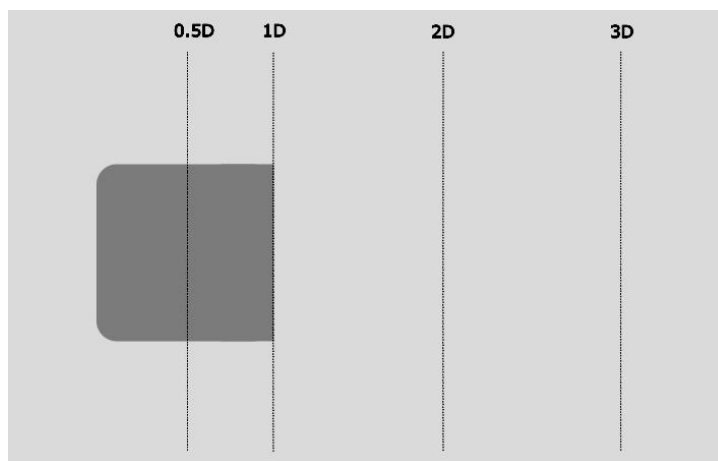


Figura 16. Punti di estrazione dei profili di pressione/velocità

Alla distanza 1D è stato estratto il profilo del C_p (vedi Fig.17) che mostra valori fortemente negativi, indicativi di un forte risucchio che tende a 'tirare' il corpo all'indietro. La resistenza aerodinamica di un corpo tozzo è infatti caratterizzata dalla bassa pressione, che agisce sulla sua superficie posteriore (base del corpo).

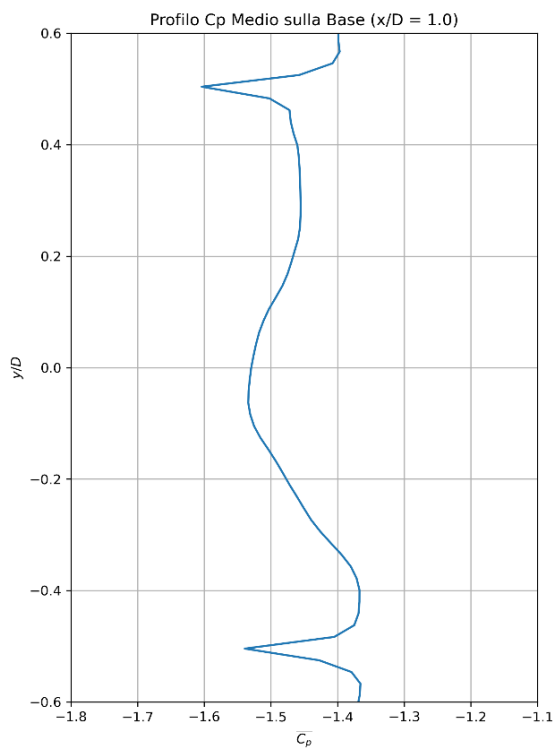
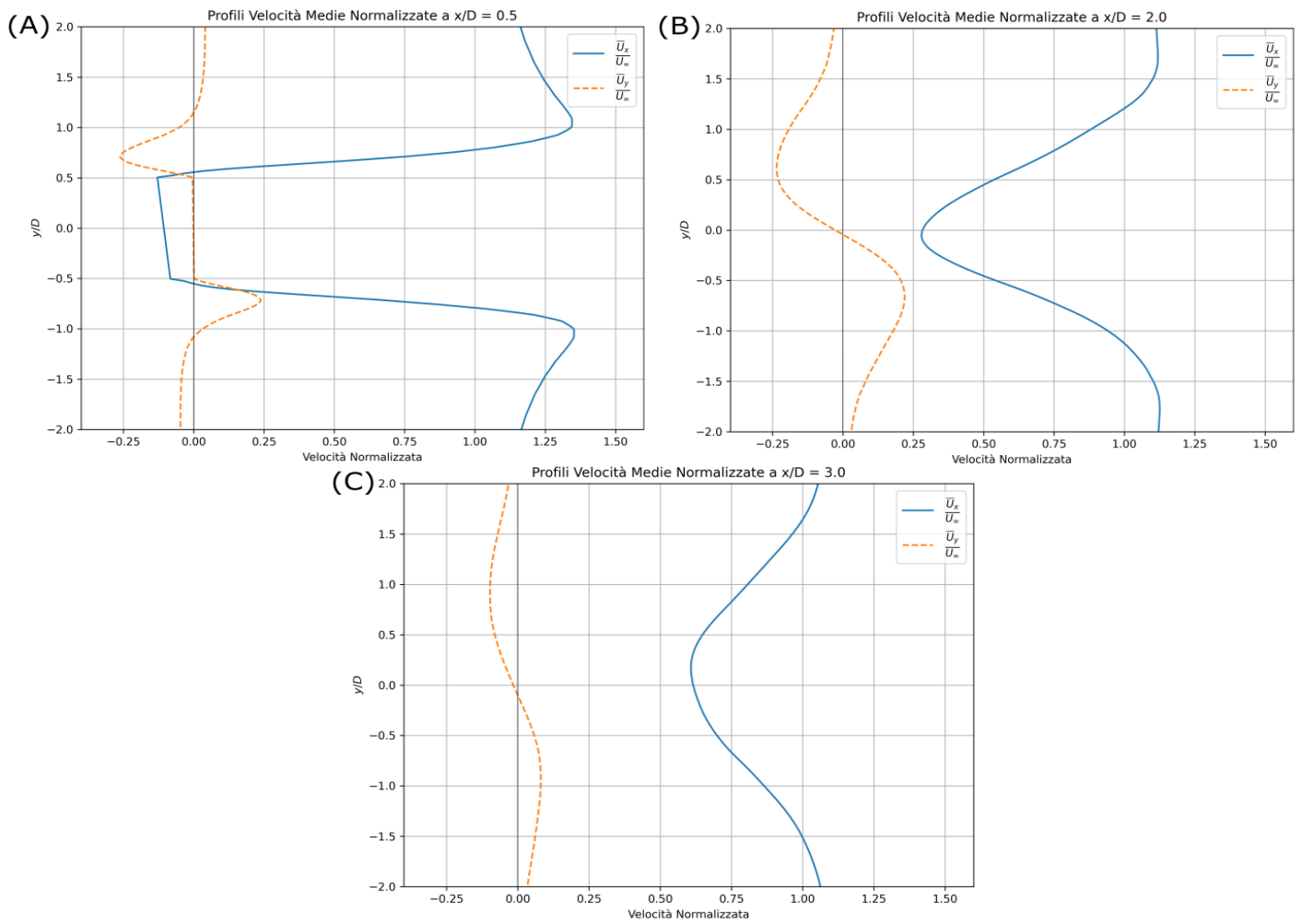


Figura 17. Cp sulla base del corpo, senza attuazione

Alla distanza 0.5D, 2D e 3D sono stati estratti invece dei profili di velocità normalizzati, come si può vedere in Fig.18



(A) x/D=0.5 (B) x/D=2.0 (C) x/D=3.0

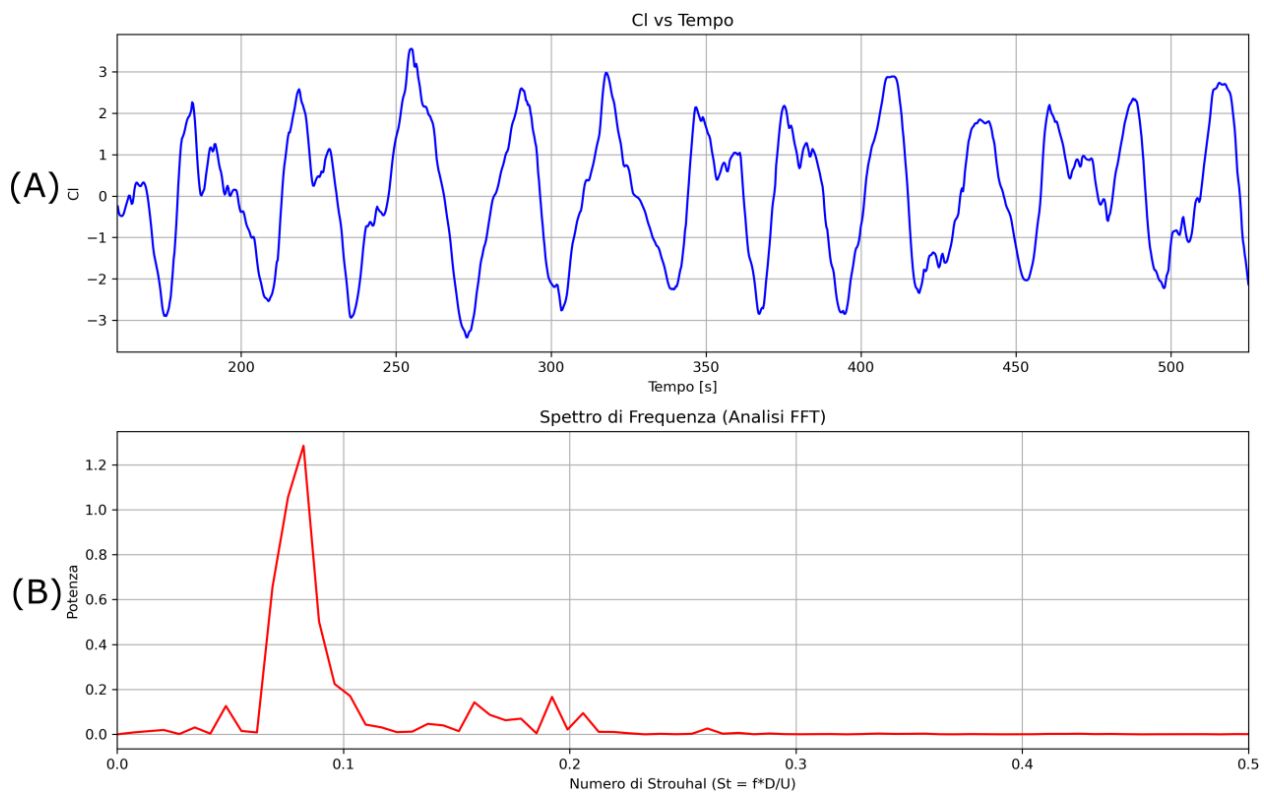
Figura 18. Profili di velocità normalizzati, senza attuazione

Il profilo di velocità a $x/D=0.5$ mostra un'ampia regione di velocità negativa, che caratterizza la bolla di ricircolo ai lati del corpo. Allontanandosi dalla base, $x/D=2$ e $x/D=3$ il profilo mostra il tipico deficit di velocità di una scia turbolenta, che si allarga e recupera gradualmente quantità di moto dal flusso esterno, in accordo con [1].

Il grafico delle forze (Fig.14), in particolare del coefficiente di portanza, ha già mostrato che il flusso non è stabile, ma oscilla costantemente nel tempo. Per analizzare e misurare in modo preciso la frequenza di queste oscillazioni, si utilizza l'analisi in frequenza.

L'analisi in frequenza del coefficiente di portanza permette di quantificare in modo preciso la dinamica di queste oscillazioni.

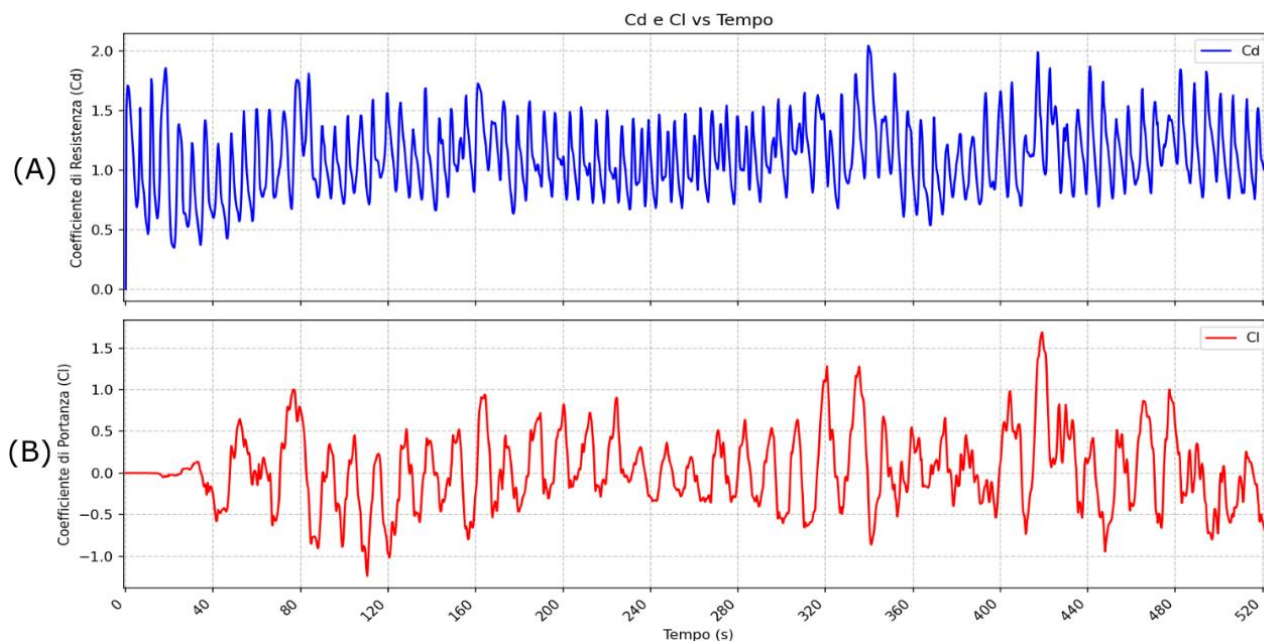
Il grafico della Densità Spettrale di Potenza Fig.19 rivela la presenza di un unico picco energetico dominante ma relativamente largo, centrato su un Numero di Strouhal pari a $St \approx 0.07$. Questo picco rappresenta la frequenza caratteristica del distacco naturale dei vortici (la natural vortex shedding frequency). La larghezza del picco suggerisce un fenomeno quasi-periodico, tipico delle scie turbolente ad alto numero di Reynolds, dove il distacco vorticoso non ha una singola e unica frequenza perfetta.



(A)=CI vs Tempo (B)=Potenza vs Numero di Strouhal

Figura 19. Densità spettrale di potenza, senza attuazione

Successivamente, è stata analizzata la medesima geometria sottoposta al controllo attivo a monte, al fine di quantificarne l'efficacia e investigarne i meccanismi fisici.



(A)=Cd vs Tempo (B)=Cl vs Tempo
Figura 20. Grafico Cd e Cl, con attuazione

L'effetto dell'attuazione è immediatamente visibile sull'andamento delle forze aerodinamiche del caso attuato. Osservando il grafico temporale delle forze (Fig.20) e confrontandolo con quello del caso non attuato, si nota una profonda trasformazione del segnale. Il Cd medio si è ridotto passando da 2.5 a circa 1.15, con una riduzione percentuale netta di circa il 54% rispetto al caso non attuato. Ancora più marcato è l'effetto sulla stabilità del flusso: le ampie e quasi-periodiche oscillazioni del coefficiente di portanza, che nel caso base caratterizzavano il violento distacco dei vortici, vengono quasi completamente soppresse e sostituite da fluttuazioni di ampiezza molto minori e più regolari. Questa drastica riduzione dell'ampiezza del Cl indica una forte regolarizzazione della scia e una diminuzione delle forze laterali instabili agenti sul corpo.

Questa modifica delle forze globali è una conseguenza diretta di un cambiamento significativo nella topologia del flusso mediato nel tempo. Il campo di velocità media normalizzata [Fig.21 (A)] rivela una scia visibilmente più allungata e stretta rispetto alla scia ampia e corta del caso non attuato. La bolla di ricircolazione a valle del corpo si estende per una distanza maggiore, circa il 46.5% in più (vedi Fig.22), inoltre la regione a bassa velocità che caratterizza la scia è più contenuta trasversalmente.

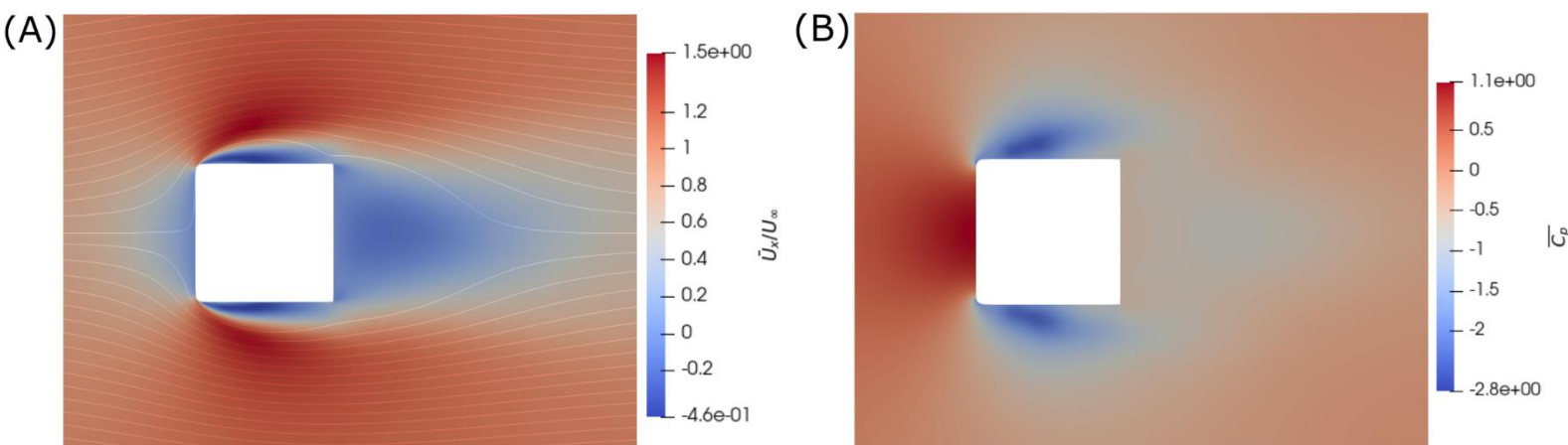
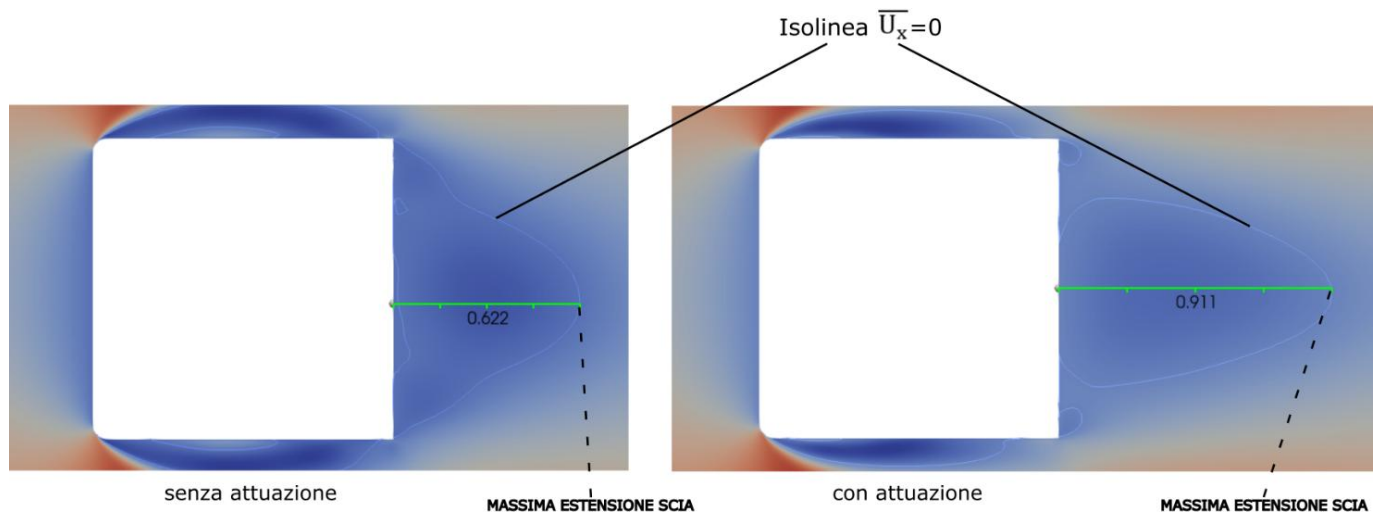


Figura 21. (A)= $\overline{U_x}/U_\infty$, (B)= $\overline{C_p}$ con attuazione



$$\text{Variazione}\% = \frac{(0.911D - 0.622D)}{0.622D} \times 100\% \approx 46.5\%$$

Figura 22. Variazione estensione scia, corpo con aspect-ratio unitario

Questo cambiamento strutturale è causato da un diverso bilancio della pressione, come evidenziato dal campo di $\overline{C_p}$, Fig.21 (B).

La zona di forte depressione immediatamente dietro la base del corpo, che nel caso non attuato era ampia e intensa, risulta notevolmente ridotta nel caso controllato. Questo fenomeno, noto come recupero di pressione, è quantificato in modo preciso dal grafico del coefficiente di pressione sulla base Fig.23, [1]

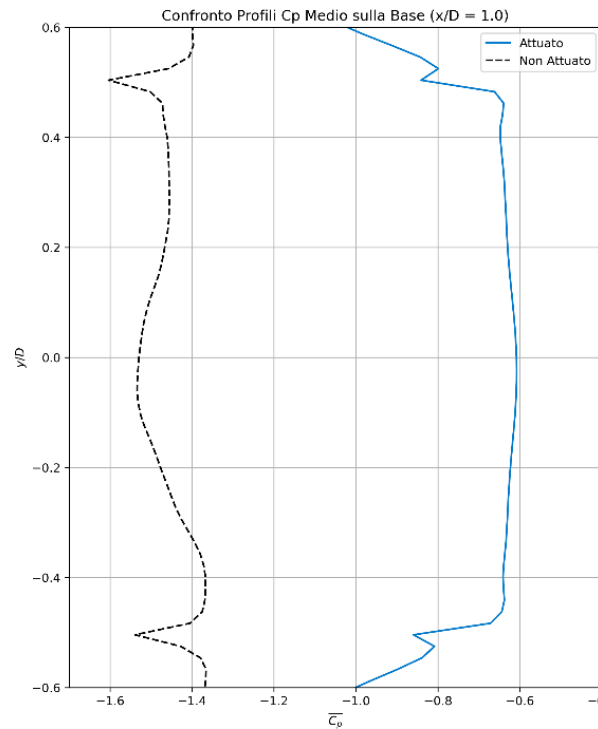


Figura 23. Cp sulla base del corpo, con attuazione

Confrontando i due casi, si osserva come l'intero profilo del C_p sulla base del corpo attuato sia traslato verso valori più alti (meno negativi), indicando una riduzione della forza di risucchio che è il meccanismo fisico primario responsabile della riduzione del drag misurata.

L'analisi dei profili di velocità locali permette di quantificare ulteriormente la riorganizzazione della scia. A una distanza di $x=0.5D$ [Fig.24 (A)], si nota un gradiente di velocità più ripido rispetto al caso non attuato. Questo fenomeno è un chiaro indicatore di un'energizzazione dello strato limite, che si traduce in una capacità penetrativa nei gradienti di pressione avversi maggiore.

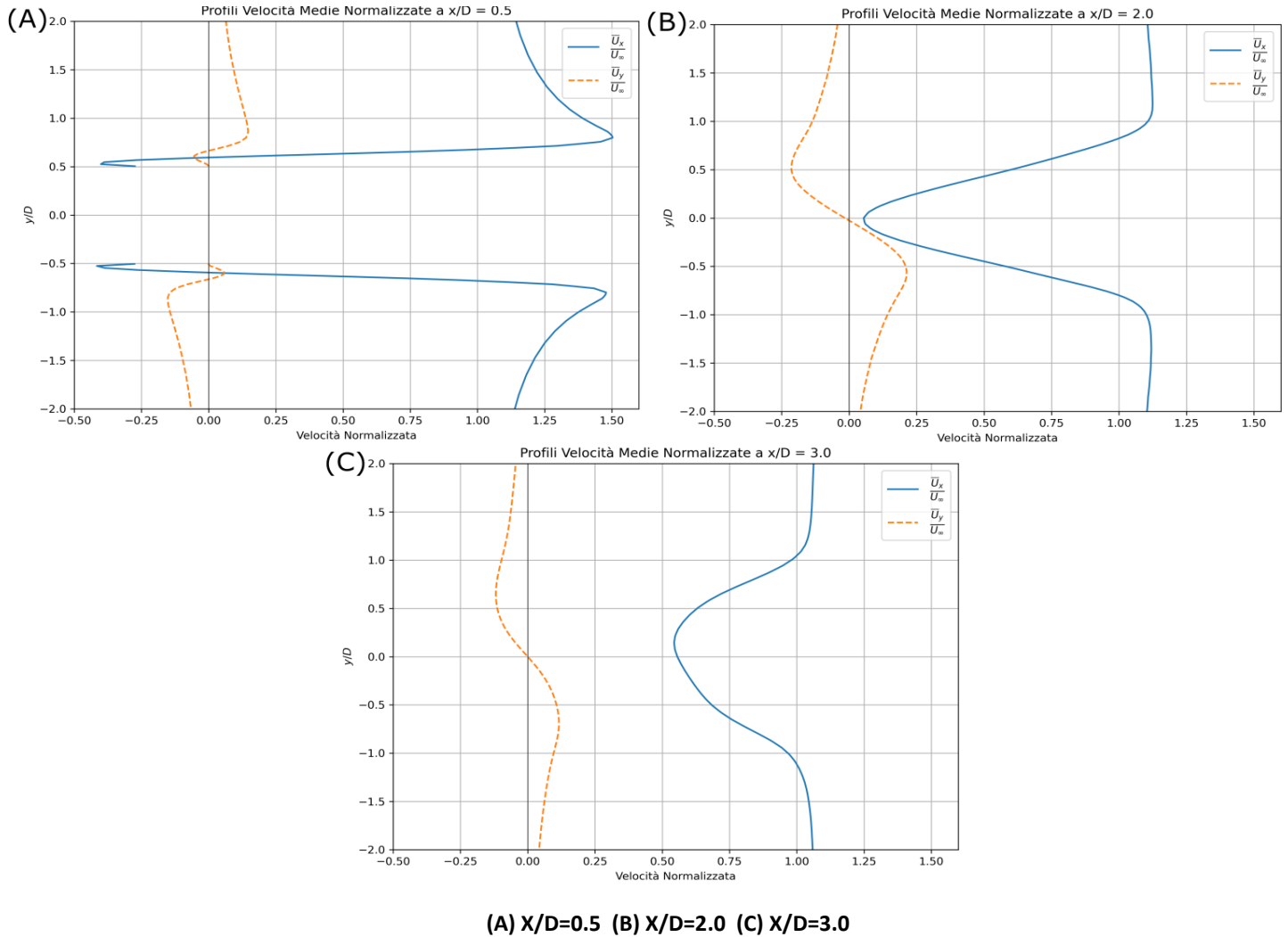


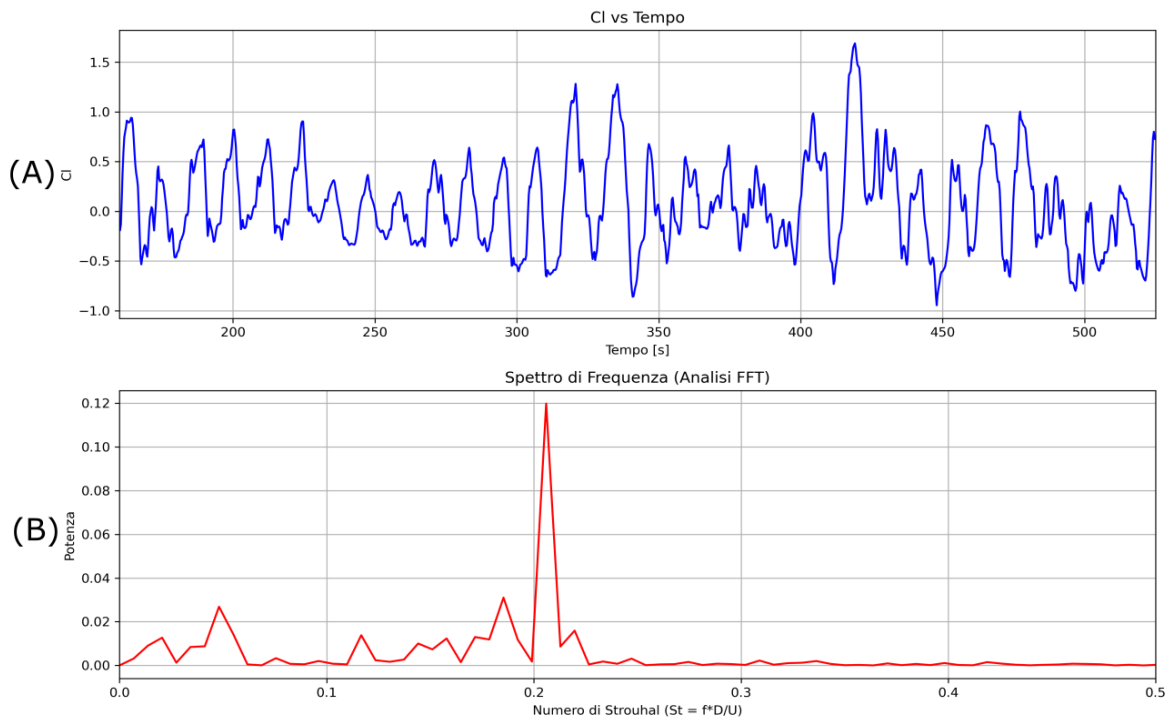
Figura 24. Profili di velocità normalizzati, con attuazione

Più a valle, L'analisi dei profili di velocità mediate nella scia, a $x/D = 2.0$ e $x/D = 3.0$ [Fig.24 (B) (C)], rivela una significativa riorganizzazione del flusso dovuta al controllo a monte.

La caratteristica più evidente è una scia notevolmente più stretta nel caso attuato rispetto al caso non attuato, indicando come il controllo riesca a contenere l'espansione laterale della regione di bassa velocità. È interessante notare come a $x/D = 2.0$, il deficit di velocità al centro della scia sia in realtà più profondo nel caso attuato, con una velocità minima di circa $0.1U_\infty$ contro lo $0.3U_\infty$ del caso base. Questo fenomeno è coerente con la formazione di una scia più allungata e stabile, dove un nucleo vorticoso più organizzato e persistente mantiene velocità più basse per una distanza maggiore, [1]. Nonostante questo deficit iniziale più marcato, la scia attuata mostra un

tasso di recupero di velocità più rapido: passando da $x/D = 2.0$ a $x/D = 3.0$, l'incremento della velocità al centro è nettamente superiore nel caso controllato. Questa combinazione di una scia più stretta e un recupero più efficiente è indicativa di una dinamica vorticoso più ordinata e meno oscillante, che si traduce in una maggiore stabilità laterale e, in ultima analisi, nella riduzione della resistenza aerodinamica, obiettivo primario del controllo.

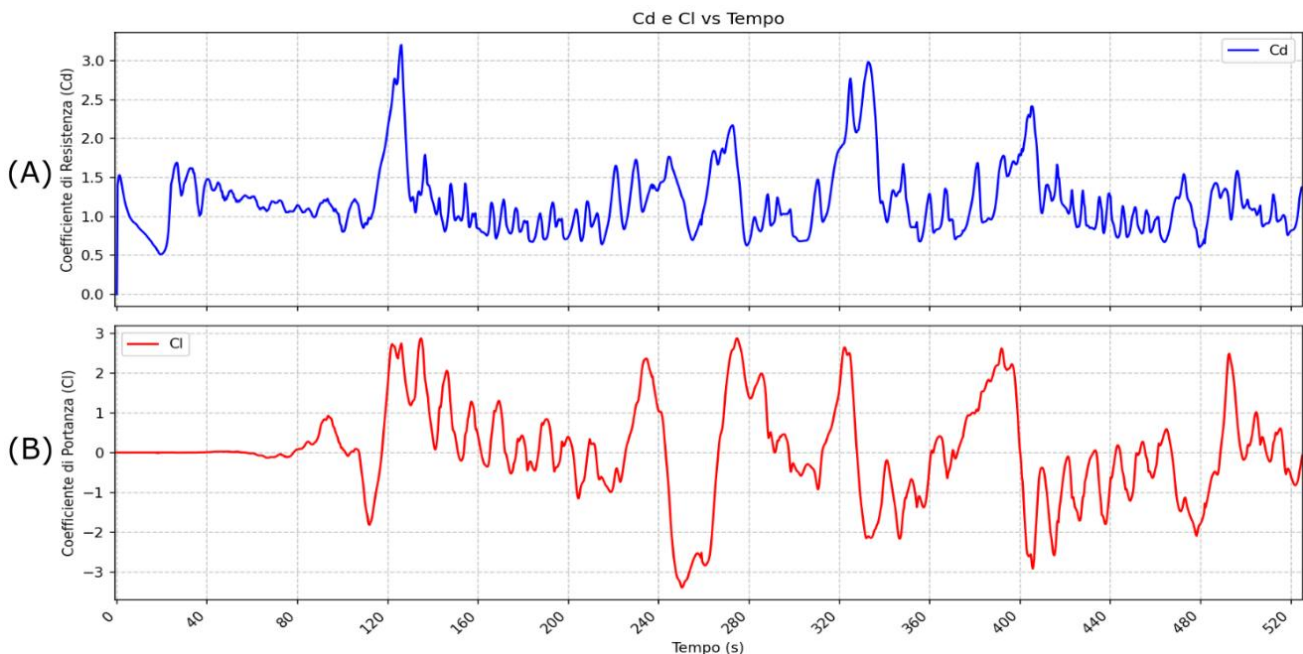
Infine, l'analisi in frequenza (Fig.25) è cruciale per comprendere la causa di questi cambiamenti. Il grafico della Densità Spettrale di Potenza è radicalmente diverso da quello del caso non attuato e fornisce la prova definitiva del successo del controllo. Come mostrato in Fig.25, il picco a $St \approx 0.07$ viene quasi completamente soppresso e sostituito da un nuovo picco dominante, molto più netto e intenso, a un Numero di Strouhal superiore, $St \approx 0.22$. Questo spostamento della frequenza dominante è un chiaro indicatore di un fenomeno di "frequency lock-in", dove l'attuazione forza la scia a oscillare a una frequenza dettata dal controllo, sopprimendo l'instabilità naturale del flusso. La maggiore nettezza del picco nel caso attuato testimonia una dinamica vorticoso molto più regolare e periodica, confermando che il controllo ha stabilizzato con successo le fluttuazioni di portanza. Questa transizione da un'oscillazione quasi-periodica a bassa frequenza a un'oscillazione forzata, stabile e ad alta frequenza è la prova fondamentale dell'efficacia del controllo nel riorganizzare l'intera dinamica della scia, [1].



(A)=CI vs Tempo (B)=Potenza vs Numero di Strouhal
Figura 25. Densità spettrale di potenza, con attuazione

Analisi del corpo con rapporto d'aspetto non unitario ($L/D=2$)

La seconda parte dell'elaborato ha investigato l'influenza della geometria del corpo sulla fluidodinamica della scia e, di conseguenza, sulla potenziale efficacia di una strategia di controllo. A tal fine è stata analizzata una configurazione con lunghezza raddoppiata ($L/D=2$), partendo anche in questo caso dalla caratterizzazione del flusso non attuato, per definire un nuovo punto di riferimento. L'analisi delle forze aerodinamiche, il cui andamento temporale è mostrato in Fig. 26, rivela immediatamente un comportamento differente rispetto al corpo con aspect-ratio unitario.



(A)=Cd vs Tempo (B)=Cl vs Tempo

Figura 26. Grafico Cd e Cl corpo allungato, senza attuazione

Dopo il transitorio iniziale, il flusso raggiunge uno stato quasi-periodico, ma il coefficiente di drag medio si attesta su un valore di $C_d \approx 1.5$. Sorprendentemente, questo valore è sensibilmente inferiore rispetto a quello del corpo di base, che si assestava a $C_d \approx 2.5$. Si tratta di una riduzione della resistenza di base di quasi il 40%, ottenuta unicamente tramite una modifica geometrica. Questo importante risultato può essere spiegato dal fenomeno del riattacco dello strato limite. La maggiore lunghezza del corpo offre allo strato limite, che si separa dagli spigoli anteriori arrotondati, la superficie necessaria per riattaccarsi lungo i lati del corpo stesso. Come discusso in letteratura, ottenere un riattacco del flusso prima degli spigoli di uscita è una strategia chiave per la riduzione della resistenza, [1]. In questo modo, la formazione della scia turbolenta viene confinata solo alla base posteriore del corpo, ottenendo quindi una scia più stretta e un aumento della pressione su tale superficie (base pressure recovery), che riduce drasticamente il drag. Tuttavia, nonostante un drag medio inferiore, le ampie e irregolari fluttuazioni sia del coefficiente di resistenza che di portanza suggeriscono una dinamica di distacco vorticoso comunque molto energetica e instabile, che sarà oggetto di analisi successive.

L'analisi dei campi mediati (Fig.27) del flusso permette di interpretare meglio la riduzione della resistenza aerodinamica osservata per il corpo allungato.

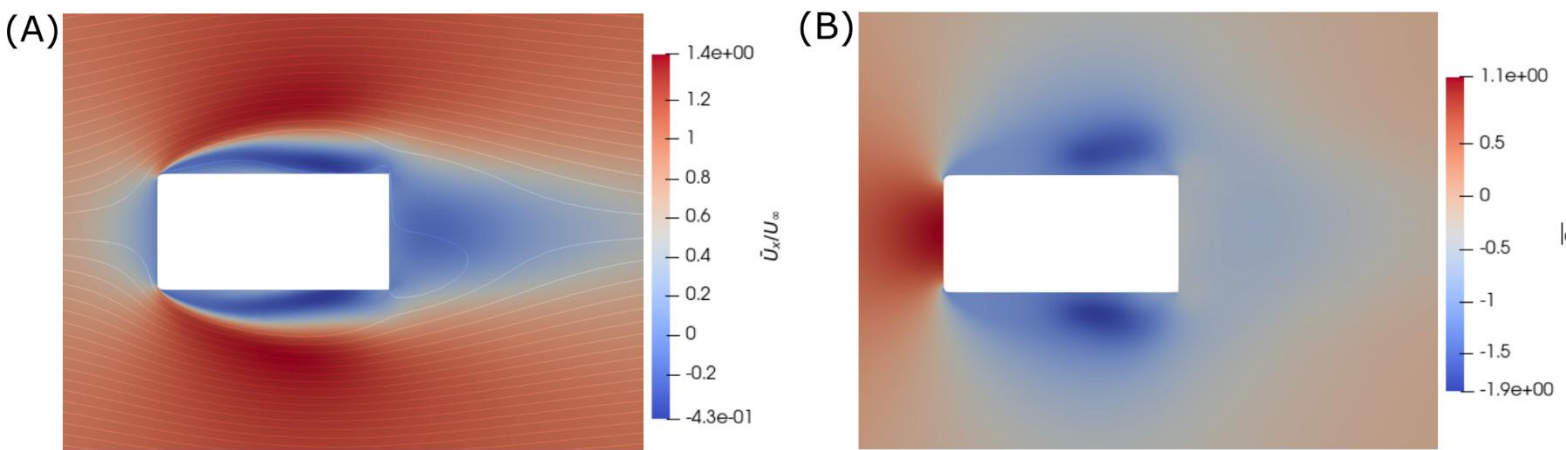


Figura 27. (A)= $\bar{U}_x/U_\infty$, (B)= $\bar{C}_p$ con attuazione

La Fig.27 (B) mostra che nonostante nella base del corpo vi sia ancora una zona di depressione, la sua intensità è minore rispetto a quella del corpo con aspect-ratio unitario. È proprio questo aumento della pressione sulla superficie posteriore che riduce la differenza di pressione complessiva tra fronte e retro del corpo, giustificando la diminuzione del coefficiente di drag medio totale. L'incremento della lunghezza del corpo ha portato ad incrementare i punti di campionamento dei profili di velocità, per un'analisi più accurata della bolla di ricircolo laterale (vedi Fig.28).

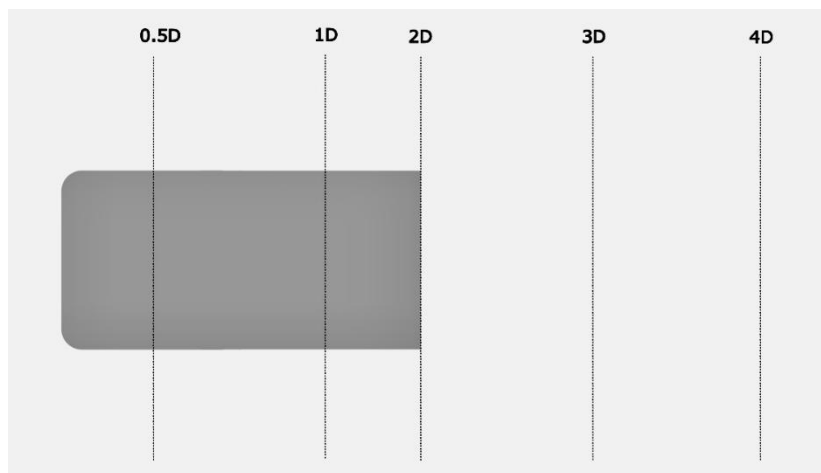
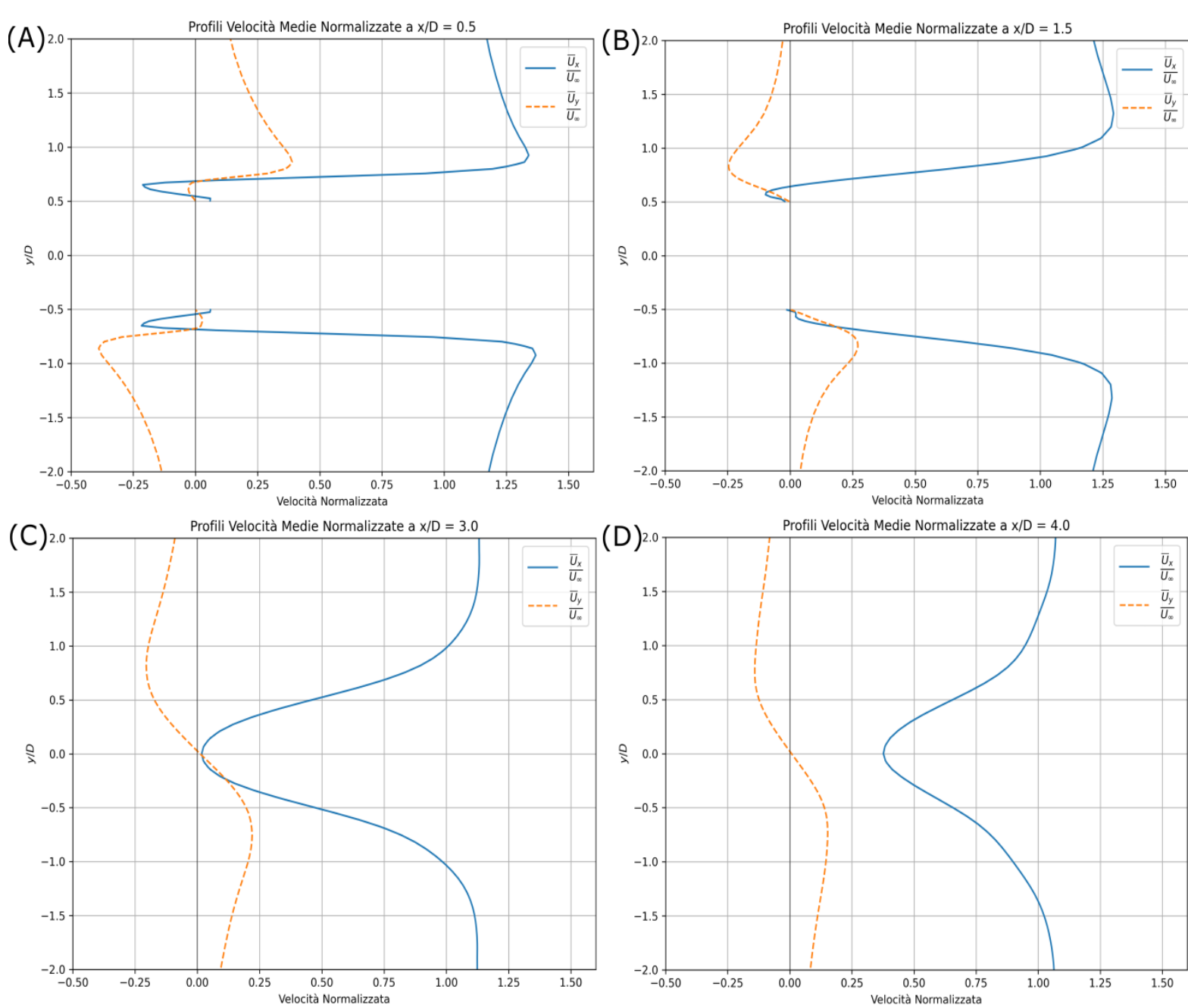


Figura 28. Punti di estrazione dei profili di pressione/velocità corpo allungato

Il profilo a $x/D = 0.5$ [Fig. 29 (A)] mostra velocità negative vicino alla parete, confermando che il flusso si è separato dallo spigolo anteriore e ha formato una bolla di ricircolo. Successivamente a $x/D = 1.5$ [Fig.29 (B)], vediamo che questa bolla è ancora presente. Questo significa che il flusso si riattacca alla superficie in un punto più a valle, compreso tra $1.5D$ e il bordo posteriore a $2.0D$.



(A) $x/D=0.5$ (B) $x/D=1.5$ (C) $x/D=3.0$ (D) $x/D=4.0$
Figura 29. Profili di velocità normalizzati corpo allungato, senza attuazione

Questo meccanismo di "separazione e riattacco" è la chiave: fa sì che la scia turbolenta si formi solo dietro la base del corpo, risultando più stretta e ordinata. Infatti, i profili successivi a $x/D = 3.0$ e $x/D = 4.0$ [Fig. 29 (C), (D)] descrivono la normale evoluzione di questa scia più contenuta.

Un altro aspetto importante viene dal profilo del C_p sulla base (Fig. 30), confrontando questo profilo con quello del corpo con $L/D=1$ (Fig. 17), si osserva che i valori di pressione, sebbene ancora negativi, sono significativamente più alti (meno negativi). È proprio questo aumento della pressione sulla superficie posteriore che riduce la differenza di pressione complessiva tra fronte e retro del corpo, giustificando la drastica diminuzione del coefficiente di drag medio totale.

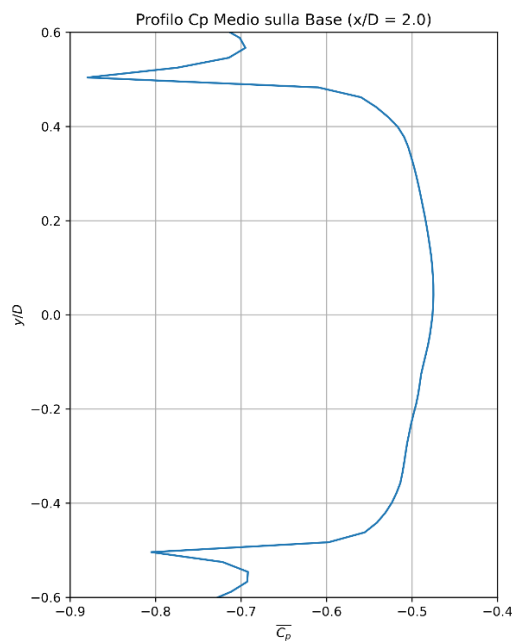
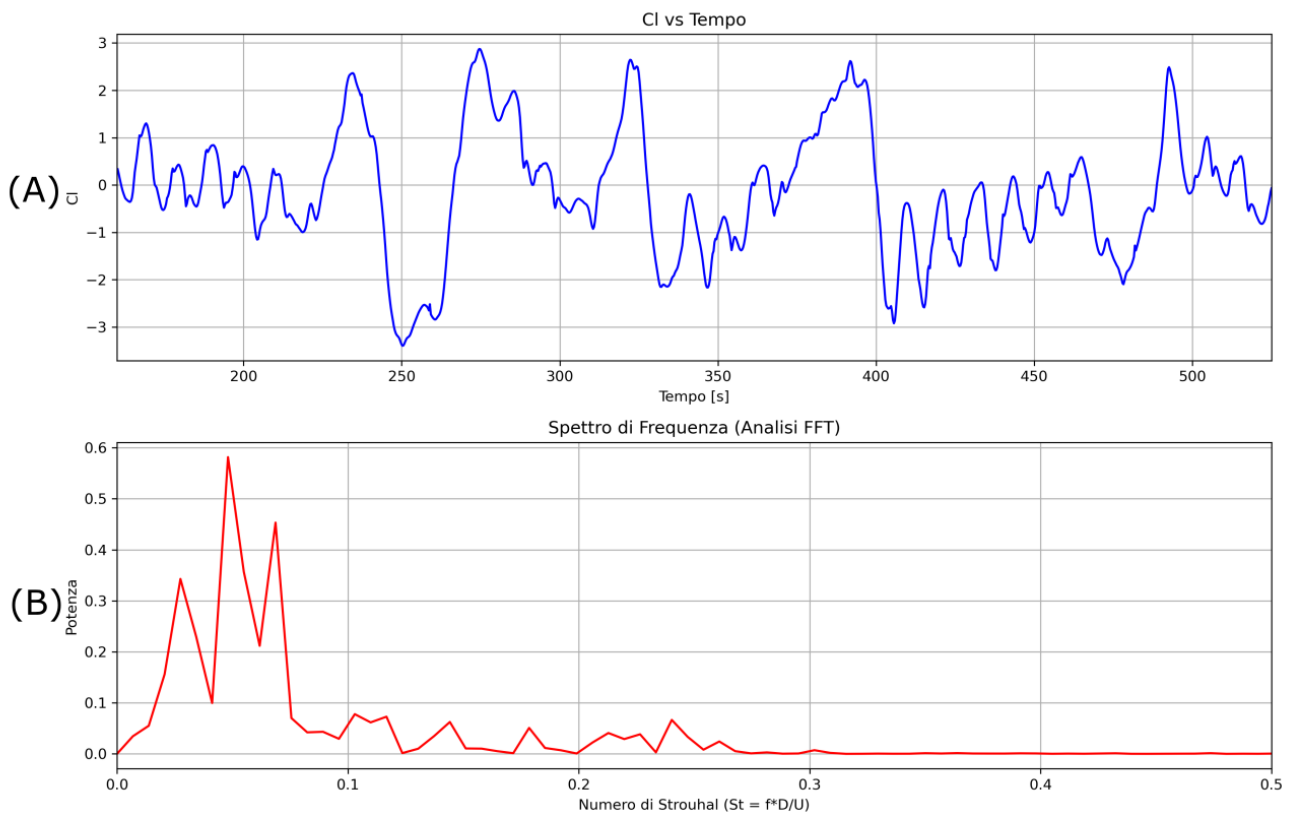


Figura 30. Cp sulla base del corpo allungato, senza attuazione

L'analisi in frequenza del coefficiente di portanza per il corpo allungato non attuato, rivela una dinamica del flusso notevolmente più complessa rispetto al corpo con aspect-ratio unitario.



(A)=CI vs Tempo (B)=Potenza vs Numero di Strouhal

Figura 31. Densità spettrale di potenza corpo allungato

A differenza dei casi precedenti, lo spettro di potenza (Fig. 31) non presenta un singolo picco netto, ma è caratterizzato da una distribuzione di energia "a banda larga" con molteplici picchi energetici. Si distinguono almeno tre picchi significativi: un picco a bassissima frequenza ($St \approx 0.025$), il picco dominante a $St \approx 0.06$, e un secondo picco molto energetico a $St \approx 0.09$.

Questa struttura spettrale complessa è caratteristica dei flussi attorno a corpi di "geometria critica" ($L/D \approx 2$), dove possono coesistere e competere diversi meccanismi di instabilità. L'interpretazione fisica più plausibile, basata sulla letteratura scientifica, è che il picco a bassa frequenza ($St \approx 0.06$) corrisponda all'instabilità globale della scia (il classico vortex shedding), un fenomeno intrinsecamente a bassa frequenza e larga scala, [8]. Al contrario, il picco a frequenza più alta ($St \approx 0.09$) può essere attribuito all'instabilità dello strato di taglio (shear layer), un meccanismo locale e più rapido che si sviluppa lungo la grande bolla di separazione laterale, [9]. La competizione e l'interazione tra questi due fenomeni impedisce al flusso di agganciarsi a una singola frequenza periodica, risultando nella dinamica complessa e multifrequenza osservata.

Infine, la medesima strategia di controllo attivo è stata applicata al corpo allungato per valutarne l'efficacia su una geometria differente.

L'analisi delle forze aerodinamiche (Fig. 32) dimostra che il controllo riesce a migliorare le prestazioni del corpo, sebbene con un'efficacia diversa rispetto al caso con aspect-ratio unitario.

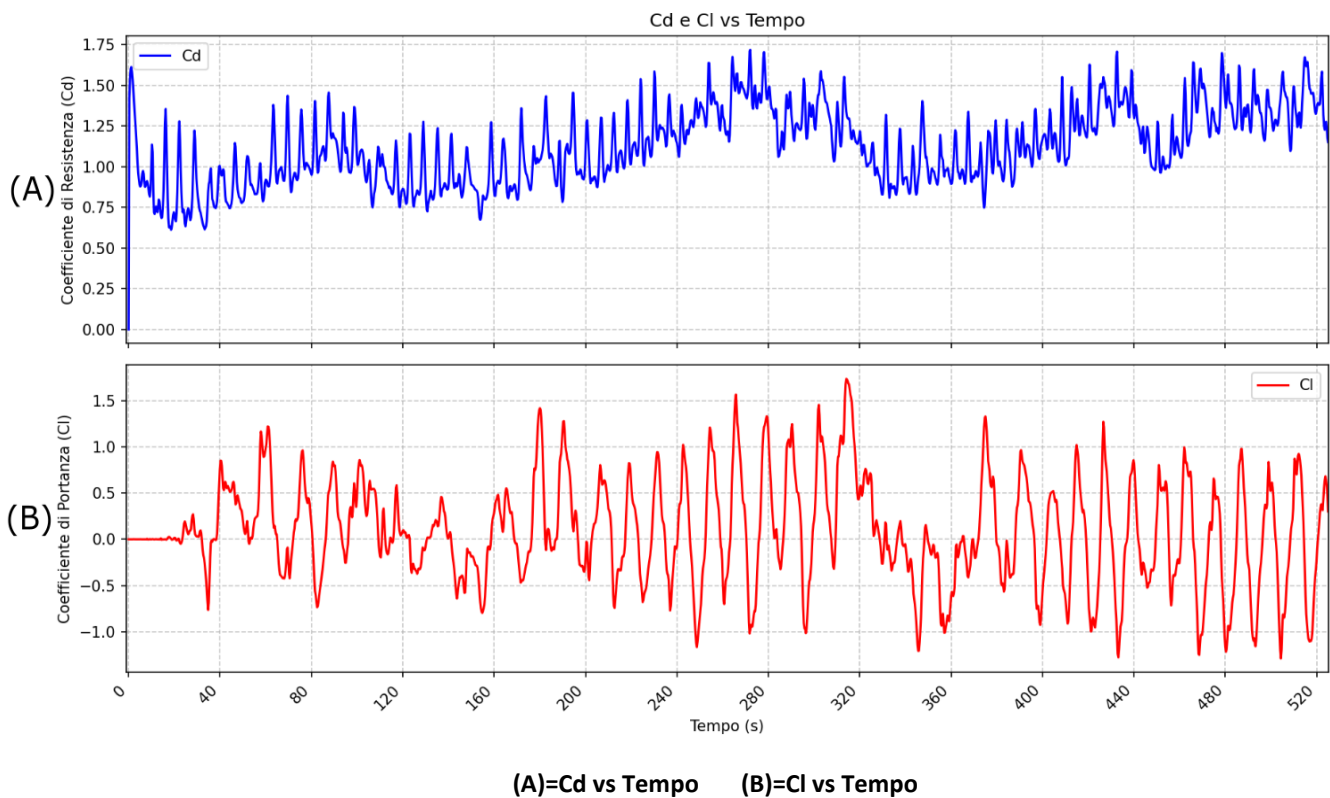


Figura 32. Grafico Cd e Cl corpo allungato, con attuazione

Il coefficiente di drag medio si riduce a $Cd \approx 1.22$, con una riduzione del 9.6% rispetto alla sua baseline non attuata. Sebbene il valore medio diminuisca, l'effetto più significativo del controllo si osserva nella stabilizzazione del flusso. Le fluttuazioni del drag appaiono più regolari e l'ampiezza delle oscillazioni del coefficiente di portanza (Cl) viene quasi dimezzata. Questa drastica riduzione delle forze laterali fluttuanti indica un notevole aumento della stabilità aerodinamica, poiché il processo di distacco vorticoso viene reso più ordinato e meno energetico dal controllo.

È interessante notare che sebbene positiva, la riduzione percentuale del drag è inferiore a quella ottenuta sulla geometria originale. Questo suggerisce che l'efficacia del controllo può dipendere dalla configurazione di base del flusso: il corpo allungato, beneficiando già di un drag inferiore

grazie al riattacco del flusso, offre un "margine di miglioramento" inferiore rispetto alla configurazione intrinsecamente meno aerodinamica del corpo corto. Inoltre i campi mediati (Fig.33) mostrano un cambiamento significativo nella topologia del flusso rispetto al caso non attuato.

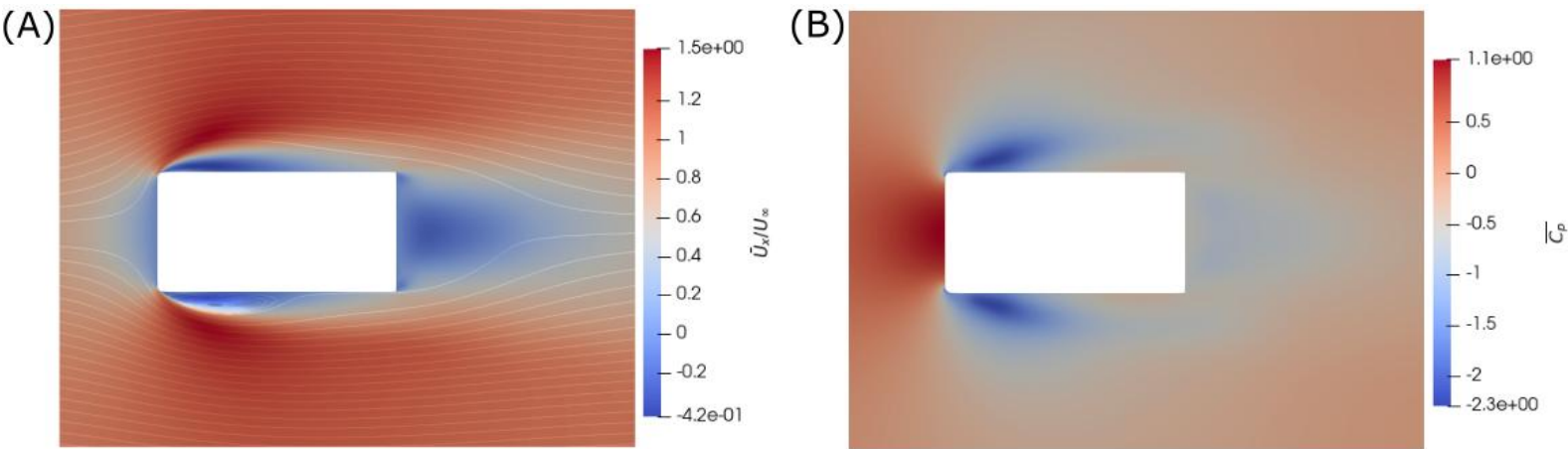
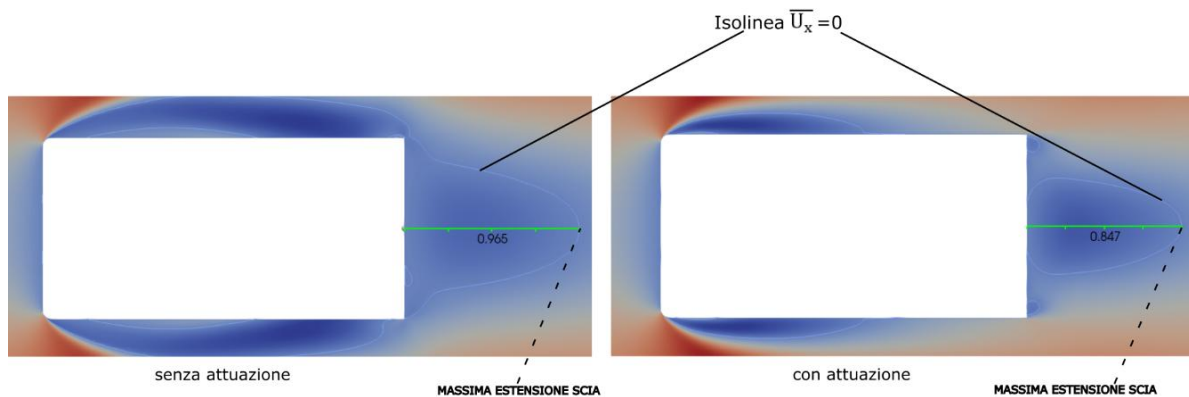


Figura 33. (A)= $\overline{U_x}/U_\infty$, (B)= $\overline{C_p}$ con attuazione

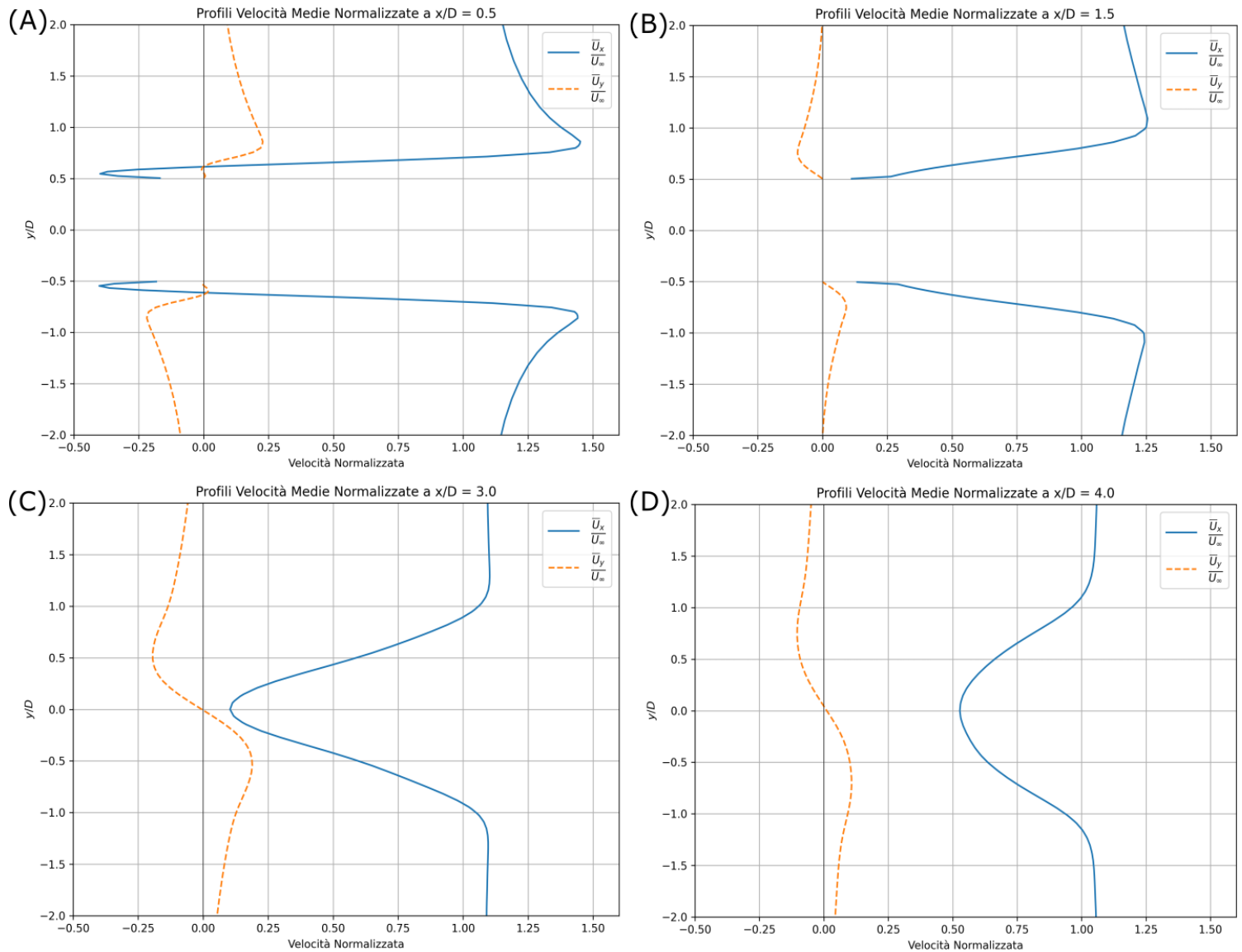
La differenza più evidente è una riduzione delle dimensioni della bolla di ricircolo laterale, questo cambiamento è corroborato in particolare dal campo di pressione [Fig.33 (B)], che ha un'evidente diminuzione di depressione sui fianchi laterali del corpo. Il mantenimento di un flusso aderente modifica la distribuzione di pressione globale, portando al recupero della pressione di base e alla conseguente riduzione del drag precedentemente osservata. In sintesi l'attuazione, pur essendo efficace nel ridurre il drag e stabilizzare il flusso, si è dimostrata meno performante in termini di riduzione percentuale rispetto alla sua applicazione sulla geometria corta, evidenziando come l'efficacia di una strategia di controllo sia strettamente dipendente dalla geometria del corpo. Un aspetto interessante che distingue questo caso rispetto al corpo con aspect-ratio unitario, è che l'attuazione porta ad una riduzione dell'estensione massima della scia di circa il 12% (Fig.34). Questo risultato è tutt'altro che scontato, poiché si è visto che come nel corpo con $L/D=1$ l'attuazione avesse inciso portando ad un allontanamento del punto di massima estensione della scia, pari al 46.5%.



$$\text{Riduzione}\% = \frac{(0.847D - 0.965D)}{0.965D} \times 100\% \approx -12.2\%$$

Figura 34. Variazione estensione scia, corpo allungato

Proseguendo con l'analisi dei profili di velocità (Fig.35), si può notare come a $x/D = 0.5$ il profilo di velocità del caso attuato mostri ancora una piccola regione di velocità negativa. Tuttavia, la differenza fondamentale emerge a $x/D = 1.5$, in questa posizione il profilo del caso attuato mostra velocità tangenziali ovunque positive. Questa è la prova di un riattacco del flusso anticipato, mentre i profili a distanza $x/D=3$ e $x/D=4$ rimangono molto simili al caso non attuato.



(A) $x/D=0.5$ (B) $x/D=1.5$ (C) $x/D=3.0$ (D) $x/D=4.0$
Figura 35. Profili di velocità normalizzati corpo allungato, con attuazione

Il coefficiente di pressione medio sulla base posteriore del corpo (Fig. 36) mostra una distribuzione di pressione notevolmente più uniforme lungo l'asse verticale rispetto al caso non attuato. È interessante notare che, mentre nella regione centrale della base la pressione è leggermente più bassa (più negativa) nel caso attuato, i picchi di forte depressione che caratterizzavano gli spigoli (a $y/D \approx \pm 0.5$) nel caso base sono stati completamente eliminati.

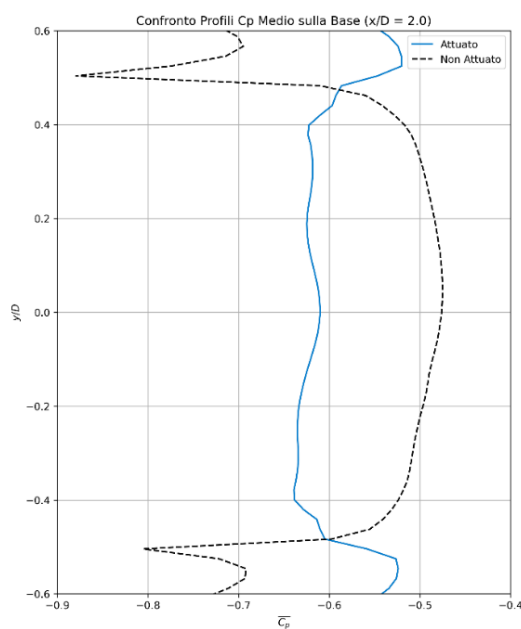
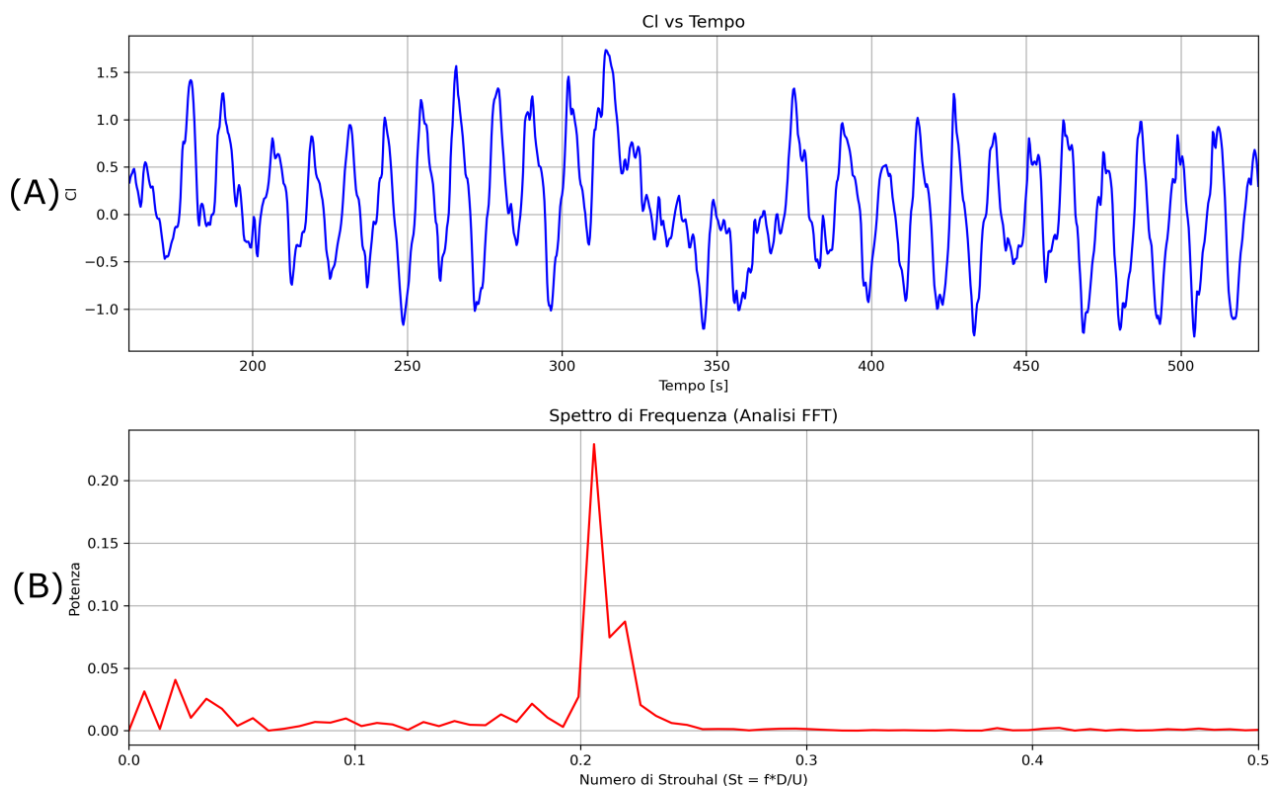


Figura 36. Cp sulla base del corpo allungato, con attuazione

Infine analizzando l'analisi in frequenza anche per quest'ultima simulazione (Fig.37), si può notare come il controllo attivo vada a sopprimere completamente la precedente dinamica multifrequenza. lo spettro di potenza è ora dominato da un singolo picco estremamente netto ad un Numero di Strouhal superiore, pari a $St = 0.2$. La transizione da uno spettro a banda larga ad una risposta monocromatica prova che il distacco vorticoso è stato reso altamente periodico e organizzato.



(A)=CI vs Tempo (B)=Potenza vs Numero di Strouhal
Figura 37. Densità spettrale di potenza corpo allungato, con attuazione

Questa drastica stabilizzazione della dinamica della scia è coerente con la riduzione delle fluttuazioni di portanza osservata in precedenza e conferma l'efficacia del controllo nel trasformare un flusso intrinsecamente instabile e complesso in un sistema più stabile e prevedibile.

Per fornire un quadro riassuntivo e facilitare il confronto diretto delle prestazioni aerodinamiche tra le diverse configurazioni analizzate, i valori medi del coefficiente di resistenza (C_d) sono stati raccolti nella Tabella 2.

Tabella Riassuntiva: Coefficiente di Drag Medio (C_d)

Caso di Studio		Cd Medio
Corpo con aspect ratio unitario ($L/D=1$) - NON ATTUATO		2.5
Corpo con aspect ratio unitario ($L/D=1$) - ATTUATO		1.15
Corpo allungato ($L/D=2$) - NON ATTUATO		1.5
Corpo allungato ($L/D=2$) - ATTUATO		1.22

Tabella 2. Valori C_d Medi

La tabella evidenzia in modo quantitativo i due effetti principali emersi dall'analisi. In primo luogo si osserva l'impatto drastico del controllo attivo sul corpo con aspect-ratio unitario, capace di ridurre il C_d da 2.5 a 1.15. In secondo luogo quantifica il vantaggio aerodinamico intrinseco della geometria allungata, il cui C_d 1.5 è già nettamente inferiore a quello del corpo corto. Infine la tabella evidenzia come, sebbene l'attuazione sia ancora efficace sul corpo allungato (riducendo il C_d da 1.5 a 1.22), il margine di miglioramento percentuale sia più contenuto.

Conclusioni

Il presente lavoro di tesi si è posto l'obiettivo di investigare l'efficacia e la robustezza di una strategia di controllo attivo del flusso a monte per un corpo tozzo, partendo da un modello numerico validato. Le principali conclusioni di questo studio possono essere sintetizzate nei seguenti punti. In primo luogo, è stata verificata con successo l'efficacia della strategia di controllo attivo sul corpo con aspect-ratio unitario ($L/D=1$). L'attuazione ha prodotto benefici aerodinamici significativi: una riduzione del coefficiente di drag medio di circa il 54% e una drastica riduzione delle fluttuazioni del C_l pari al 71.69% (calcolata con lo script 'variazione_fluttuazioni.ipynb'), indicativa di una maggiore stabilità.

In secondo luogo, questo studio ha dimostrato che la geometria del corpo ha un impatto fondamentale e non intuitivo sull'aerodinamica di base. Raddoppiando la lunghezza del corpo ($L/D=2$), si è osservata una sorprendente riduzione del drag medio di circa il 40% rispetto al corpo corto non attuato. Questo fenomeno è stato attribuito al riattacco del flusso lungo le fiancate del corpo, un meccanismo che confina la formazione della scia alla sola base posteriore, portando a un significativo recupero della pressione di base. Applicando lo stesso segnale di controllo (utilizzato per il corpo con $L/D=1$) al corpo allungato, la riduzione del drag è risultata più contenuta, attestandosi al 9.6%. Questo risultato è cruciale: dimostra che sebbene la strategia sia robusta nel forzare la dinamica del flusso, la sua efficienza in termini di riduzione del drag non è universale. Per massimizzare le performance, il segnale di controllo andrebbe risintonizzato sulla specifica configurazione geometrica. In sintesi, questo lavoro non solo conferma il grande potenziale del controllo a monte per la riduzione del drag e la stabilizzazione del flusso, ma fornisce anche un'importante evidenza numerica della sua sensibilità alla geometria.

Un aspetto di particolare interesse, emerso dal confronto tra i risultati di questo studio e quelli presenti in [1], è la presenza di lievi ma significative discrepanze, sia nel valore del Numero di Strouhal per il flusso non attuato, sia nel fenomeno di 'lock-in' nel caso attuato. Infatti come descritto in [1], applicando il segnale attuativo il numero St ottenuto dovrebbe corrispondere alla frequenza normalizzata del segnale stesso (che è $F1+=0.42$, come descritto nella Metodologia). Queste differenze non inficiano la validità del lavoro, ma al contrario, offrono importanti spunti di riflessione sulle conseguenze delle scelte di modellazione. Infatti in [1] è stata realizzata una simulazione 3D, mentre invece in questa tesi si è optato per una simulazione 2D, che non può per sua natura catturare le complesse instabilità tridimensionali del flusso turbolento, le quali influenzano la dinamica globale della scia e, di conseguenza, la sua frequenza di shedding.

Infine, un terzo fattore è legato alla complessità della replicazione numerica. Realizzare una simulazione CFD partendo da zero introduce inevitabilmente delle differenze rispetto a un lavoro di riferimento, legate alla specifica griglia di calcolo e agli schemi numerici utilizzati. Anche minime differenze nella discretizzazione spaziale e temporale possono portare ad una leggera diffusione numerica, influenzando la previsione esatta della frequenza di shedding. Tuttavia la bontà di questo studio è confermata dalle riduzioni del C_d osservabili replicando il segnale attuativo utilizzato in [1]. Questo studio preliminare vuole infatti dimostrare l'efficacia del controllo anche per un corpo allungato, e rappresentare il primo passo verso una più approfondita analisi 3D.

Appendice

Tutti i casi di simulazione e gli script di post-processing discussi in questa tesi sono disponibili pubblicamente nel seguente repository GitHub, in modo tale da garantirne la riproducibilità.

Link Repository: <https://github.com/guglielmo-minelli-unibo/Studio-CFD-del-controllo-di-scia-di-un-corpo-tozzo-con-attuazione-al-bordo-d-attacco>.

Software Richiesti:

- **OpenFOAM v12**
- **ParaView**
- **Python** (con librerie pandas, matplotlib, numpy)
- **Gmsh** (per visualizzare/modificare la mesh)

Struttura del Repository:

Vi è una cartella generale contenente tre sottocartelle: una per la geometria con aspect-ratio unitario, una per la geometria allungata e una che contiene le mesh delle due geometrie. Ciascuna sottocartella delle simulazioni contiene a sua volta due ulteriori cartelle, una per il caso attuato e una per il caso non attuato (Vedi Fig.38)



(A)=Cartelle Principali (B)=Cartelle Secondarie delle simulazioni

Figura 38. Disposizione cartelle della simulazione

Guida all'Esecuzione delle Simulazioni

Per avviare la simulazione, è necessario posizionarsi nella cartella del caso di interesse ed eseguire lo script run.sh. Sono tuttavia necessarie delle note preliminari:

- **Impostazione dei Processori:** Prima di avviare la simulazione, è necessario modificare il file run.sh, sostituendo il valore della variabile numberOfProcessors con il numero di core disponibili sul proprio computer. Lo stesso numero deve essere inserito anche nel parametro numberOfSubdomains, che si trova nel file system/decomposeParDict.
- **Variazione script di esecuzione:** Per il caso attuato il file run.sh è stato modificato in run1.sh, la struttura dei due file è sostanzialmente identica ma il secondo garantisce una ricostruzione selettiva e più ottimizzata. In particolare run1.sh ricostruisce il campo di velocità (che è il più pesante) solamente da time step 340, questo perché l'attuazione rende la simulazione molto pesante a causa delle condizioni al contorno presenti negli slot di attuazione, in cui vengono letti i valori di velocità da tabelle con dimensioni molto elevate.
- **Pulizia della Cartella:** Per eliminare i risultati di una simulazione e ripulire la cartella, è disponibile lo script clean.sh.

Post-Processing

L'analisi dei dati è stata condotta tramite notebook Jupyter e script Python.

Grafici dei Coefficienti di Forza: Per la creazione dei grafici temporali di C_l e C_d , è stato utilizzato il file Jupyter Notebook CdeCl.ipynb.

Analisi in Frequenza (FFT): per ottenere invece i grafici dell'analisi in frequenza sono presenti due file: 'prepara_dati_fft.py' e 'fft_corretto1.py'.

'prepara_dati_fft.py' ha il compito di organizzare i dati forniti in output dalla funzione forceCoeffs, in particolare va a cercare il file postProcessing/forceCoeffs1/0/forceCoeffs.dat ed estrae solo la colonna del tempo e del C_l , salvandola in un file 'segnale_Cl.dat'.

Successivamente il file 'fft_corretto1.py' legge il file 'segnale_Cl.dat' e lo filtra escludendo il transitorio iniziale (considera l'intervallo temporale da 160 a 525s), su questo segnale preparato, viene applicata la Trasformata Veloce di Fourier (FFT) per calcolarne lo spettro di potenza. Per praticità l'asse delle frequenze viene convertito da Hertz (Hz) al Numero di Strouhal adimensionale (St), utilizzando la velocità indisturbata ($U_\infty=0.4\text{m/s}$) e la dimensione caratteristica del corpo ($D=1.0\text{m}$) definite nello script. Infine, lo script genera e salva automaticamente un'immagine in formato PNG contenente due grafici sovrapposti: in alto, l'andamento del C_l nel tempo (da 160s a 525s), e in basso, il corrispondente spettro di potenza in funzione del Numero di Strouhal.

Bibliografia

1. G. Minelli, T. Dong, B. R. Noack, and S. Krajnović, "Upstream actuation for bluff-body wake control driven by a genetically inspired optimization," *Journal of Fluid Mechanics*, 2020.
2. "Control of Flow Over a Bluff Body" Haecheon Choi, Woo-Pyung Jeon and Jin-sung Kim
3. Lay Chuan Eun, Azmin Shakrine Mohd Rafie, Surjatin Wiriadidjaja, Omar Faruqi Marzuki, "An overview of passive and active drag reduction methods for bluff body of road vehicles"
4. Leishman, J. G. (2022). "Introduction to Aerospace Flight Vehicles". Embry-Riddle Aeronautical University.
5. Liang, Vinci, S. (2019). "Caratterizzazione della scia di un veicolo tramite tecnica PIV", pp. 9-10. <https://webthesis.biblio.polito.it/11260/1/tesi.pdf>
6. Efsthathios Konstantinidis, "Active Control of Bluff-Body Flows Using Plasma Actuators"
7. <https://airshaper.com/videos/diy-aerodynamics-2-vortex-generators/MC6woj6tsQY>
8. Williamson, C. H. K. (1996). Vortex dynamics in the cylinder wake.
9. Kundu, P. K., & Cohen, I. M. (2015). *Fluid Mechanics*.

Ringraziamenti

Un sentito ringraziamento va al Professor Minelli, relatore di questa tesi, per la sua costante disponibilità. I suoi consigli si sono rivelati indispensabili sia durante la realizzazione delle simulazioni che nella fase di stesura della tesi.

Ringrazio anche i miei genitori, per il loro immancabile sostegno e per avermi incoraggiato nei momenti di difficoltà che ho incontrato durante il percorso universitario.