



Università degli Studi di Genova
Scuola Politecnica
City University London
School of Engineering and Mathematical Sciences



Controllo della Scia di Corpi Tozzi Usando Filamenti Flessibili

Edoardo Alinovi

Relatori:

Chiar.mo Prof. Alessandro Bottaro
Chiar.mo Prof. Alfredo Pinelli

Correlatore:

Dr. Mohammad Omidyeganeh

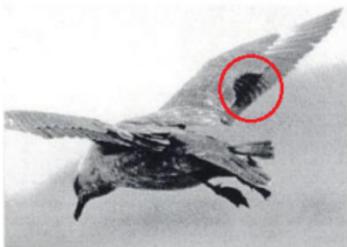
22 Luglio 2014

Sommario

- 1 Introduzione
- 2 Metodo Numerico
- 3 Validazione
- 4 Simulazioni tridimensionali
- 5 Conclusioni
- 6 Sviluppi Futuri

Motivazioni

La biomimetica è la scienza che trae ispirazione dagli esseri viventi per il miglioramento delle tecnologie moderne.

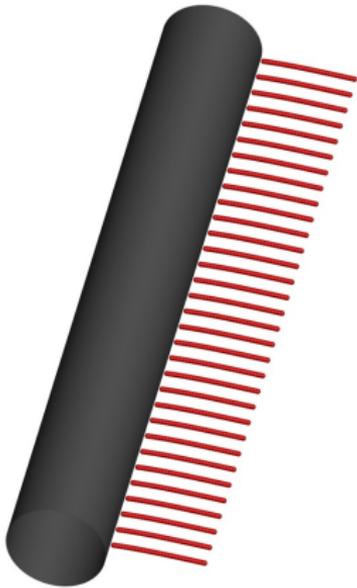


- Le interazioni fluido-struttura sono comuni in natura:
 - Gli uccelli estendono le piume sulla parte superiore delle ali durante l'atterraggio, migliorando la loro aerodinamica
 - I batteri sono dotati di flagelli che, mossi nel fluido circostante, generano propulsione

Caso di studio

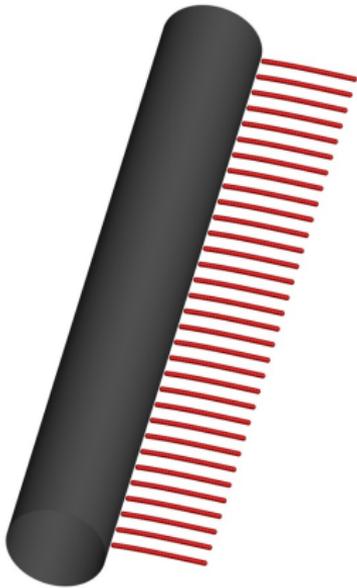
- Il cilindro è il prototipo più semplice di corpo tozzo

Caso di studio



- Il cilindro è il prototipo più semplice di corpo tozzo
- Consideriamo un cilindro dotato di una serie di filamenti flessibili incernierati al bordo d'uscita

Caso di studio



- Il cilindro è il prototipo più semplice di corpo tozzo
- Consideriamo un cilindro dotato di una serie di filamenti flessibili incernierati al bordo d'uscita
- I filamenti sono:
 - Massivi
 - Inestensibili
 - Flessibili

Obiettivi

- Sviluppare uno strumento per la soluzione di problemi di interazione fluido-struttura tridimensionali
- Caratterizzare la dinamica dei filamenti
- Effetto sulla struttura della scia del cilindro
- Misurare le prestazioni aerodinamiche del corpo dotato di filamenti

Obiettivi

- Sviluppare uno strumento per la soluzione di problemi di interazione fluido-struttura tridimensionali
- Caratterizzare la dinamica dei filamenti
- Effetto sulla struttura della scia del cilindro
- Misurare le prestazioni aerodinamiche del corpo dotato di filamenti

Obiettivi

- Sviluppare uno strumento per la soluzione di problemi di interazione fluido-struttura tridimensionali
- Caratterizzare la dinamica dei filamenti
- Effetto sulla struttura della scia del cilindro
- Misurare le prestazioni aerodinamiche del corpo dotato di filamenti

Obiettivi

- Sviluppare uno strumento per la soluzione di problemi di interazione fluido-struttura tridimensionali
- Caratterizzare la dinamica dei filamenti
- Effetto sulla struttura della scia del cilindro
- Misurare le prestazioni aerodinamiche del corpo dotato di filamenti

Metodo Numerico

La soluzione dei problemi di interazione fluido struttura coinvolge tre aspetti:

- Soluzione del campo di moto del fluido
- Soluzione della deformazione della struttura
- Accoppiamento tra fluido e struttura

Metodo Numerico

La soluzione dei problemi di interazione fluido struttura coinvolge tre aspetti:

- Soluzione del campo di moto del fluido
- Soluzione della deformazione della struttura
- Accoppiamento tra fluido e struttura

Metodo Numerico

La soluzione dei problemi di interazione fluido struttura coinvolge tre aspetti:

- Soluzione del campo di moto del fluido
- Soluzione della deformazione della struttura
- Accoppiamento tra fluido e struttura

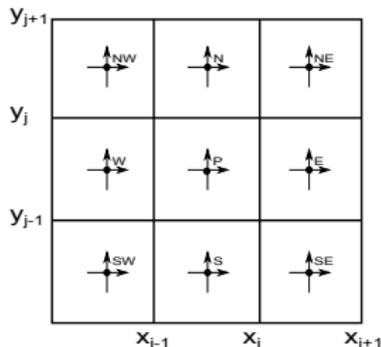
Il Fluido

Equazioni di Navier-Stokes incompressibili:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + \frac{1}{Re} \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f}$$
$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

Soluzione tramite:

- Codice Fortran 77 parallelo
- Metodo ai volumi finiti
- Discretizzazione su griglie collocate
- Fractional Step Method



La Struttura

Equazione del filamento:

$$\frac{\partial^2 \mathbf{X}}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial s} \left(T \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial s} \right) - K_B \frac{\partial^4 \mathbf{X}}{\partial s^4} + Ri \frac{\mathbf{g}}{|\mathbf{g}|} - \mathbf{F}$$

$$\frac{\partial \mathbf{X}}{\partial s} \cdot \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial s} = 1, \quad \text{condizione di inestensibilità}$$

Condizioni al Contorno

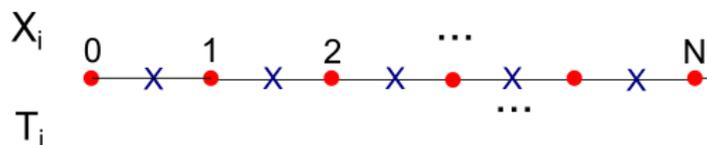
Estremo fisso:

$$\mathbf{X}(0, t) = \mathbf{0}, \quad \text{oppure} \quad \frac{\partial \mathbf{X}(0, t)}{\partial s} = \boldsymbol{\alpha}, \quad \frac{\partial^2 \mathbf{X}(0, t)}{\partial s^2} = \mathbf{0}$$

Estremo libero:

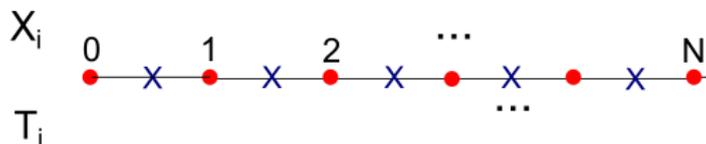
$$T(L, t) = 0, \quad \frac{\partial^2 \mathbf{X}(L, t)}{\partial s^2} = \mathbf{0}, \quad \frac{\partial^3 \mathbf{X}(L, t)}{\partial s^3} = \mathbf{0}$$

Discretizzazione su griglia sfalsata:



- Il filamento viene discretizzato in N punti lagrangiani
- In 3D si ottiene un sistema di $4N + 1$ equazioni non lineari
- Il nodo per la tensione è posto tra due punti lagrangiani
- Il sistema risolutivo viene risolto iterativamente con il metodo di Newton-Raphson

Discretizzazione su griglia sfalsata:



- Il filamento viene discretizzato in N punti lagrangiani
- In 3D si ottiene un sistema di $4N + 1$ equazioni non lineari
- Il nodo per la tensione è posto tra due punti lagrangiani
- Il sistema risolutivo viene risolto iterativamente con il metodo di Newton-Raphson

$$\left\{ \begin{array}{l} F_1(\mathbf{X}_1^{n+1}, T_1^{n+1}, T_0^{n+1}) = 0 \\ F_2(\mathbf{X}_2^{n+1}, T_1^{n+1}) = 0 \\ \vdots \\ F_i(\mathbf{X}_i^{n+1}, T_i^{n+1}) = 0 \\ \vdots \\ F_{4N+1}(\mathbf{X}_N^{n+1}, T_N^{n+1}) = 0 \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \mathbf{J}(u^{(k)})\delta u^{(k)} = -\mathbf{F}^k(u^{(k)}) \\ \delta u^{(k+1)} = u^{(k+1)} - u^{(k)} \end{array} \right.$$

Il sistema linearizzato viene risolto k volte fino al raggiungimento di un residuo massimo di 10^{-10} .

Accoppiamento tra Fluido e Struttura

Il metodo dei contorni immersi:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + \frac{1}{Re} \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f}$$

- Le equazioni di Navier-Stokes vengono forzate in modo da ricreare la presenza del corpo
- Si evita l'uso di griglie mobili o deformabili che si adattano al corpo in movimento

- Il fluido è discretizzato su una griglia, detta euleriana
- Il corpo solido è discretizzato su una griglia, detta lagrangiana

Occorre svolgere i seguenti passi:

- Interpolare la velocità sul punto lagrangiano:

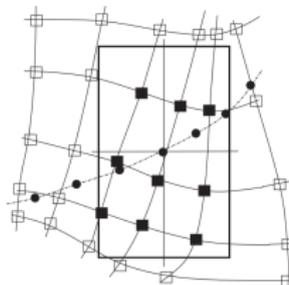
$$\mathbf{U}(\mathbf{X}_k, t^n) = \mathcal{I}(\mathbf{u})$$

- Calcolare la forza che ristabilisce la corretta condizione al contorno sul punto lagrangiano:

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}_k, t^n) = \frac{\mathbf{u}^r(\mathbf{X}_k, t^n) - \mathbf{u}(\mathbf{X}_k, t^n)}{\Delta t}$$

- Distribuire la forza sulla griglia euleriana:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}_{i,j,k}, t^n) = \mathcal{C}[\mathbf{F}(\mathbf{X}_k, t^n)]$$



- Punto lagrangiano sul corpo discretizzato, □ punti di griglia, ■ punti di griglia dentro al supporto

- Il fluido è discretizzato su una griglia, detta euleriana
- Il corpo solido è discretizzato su una griglia, detta lagrangiana

Occorre svolgere i seguenti passi:

- Interpolare la velocità sul punto lagrangiano:

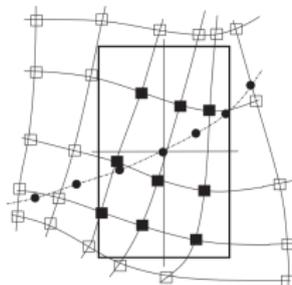
$$\mathbf{U}(\mathbf{X}_k, t^n) = \mathcal{I}(\mathbf{u})$$

- Calcolare la forza che ristabilisce la corretta condizione al contorno sul punto lagrangiano:

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}_k, t^n) = \frac{\mathbf{u}^r(\mathbf{X}_k, t^n) - \mathbf{u}(\mathbf{X}_k, t^n)}{\Delta t}$$

- Distribuire la forza sulla griglia euleriana:

$$\mathbf{f}(\mathbf{x}_{i,j,k}, t^n) = \mathcal{C}[\mathbf{F}(\mathbf{X}_k, t^n)]$$



- Punto lagrangiano sul corpo discretizzato, \square punti di griglia, \blacksquare punti di griglia dentro al supporto

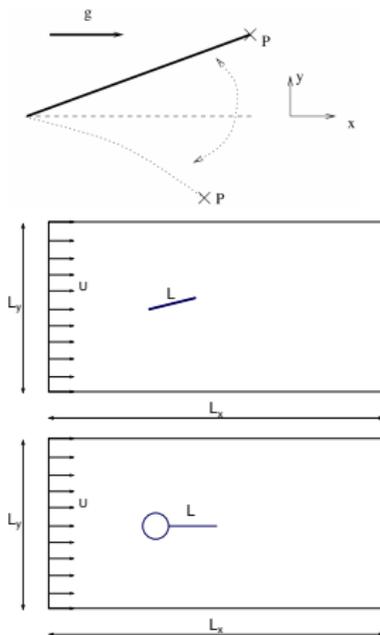
Una funzione $g(s)$ in un certo punto $x \in \Omega$ si approssima:

$$g(x) = \int_{\Omega} \delta_d(x - s) g(s) ds$$

- δ_d approssima la delta di Dirac

Validazione

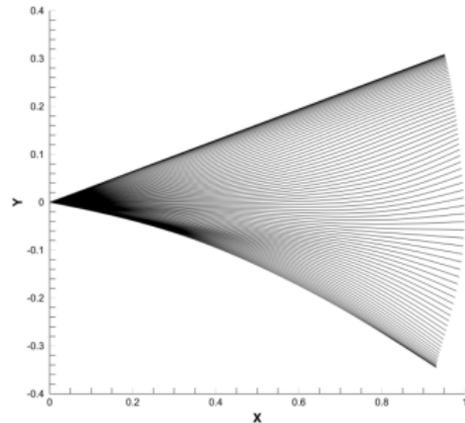
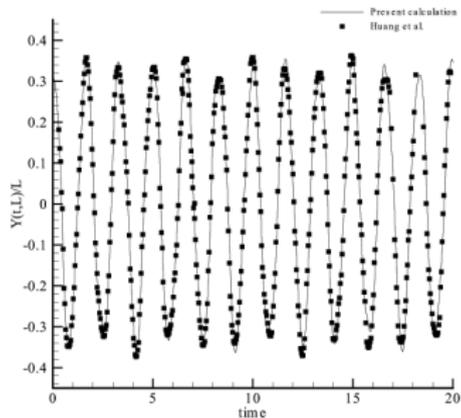
- Filamento soggetto a sola gravità
- Filamento soggetto ad un flusso uniforme
- Filamento incernierato dietro un cilindro bidimensionale



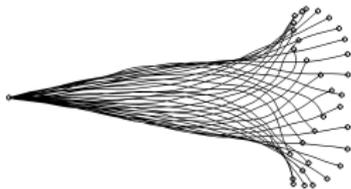
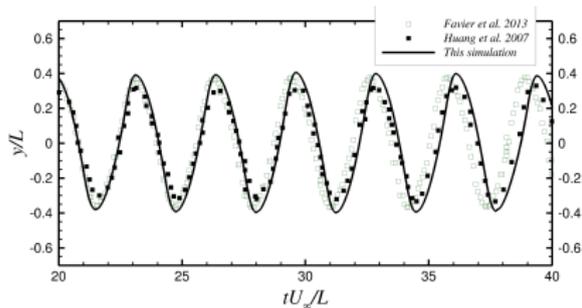
Filamento Soggetto a Gravità

Pure gravity driven filament

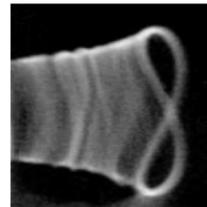
Length	L	1.0
Bending Stiffness	K_b	0.01
Richardson number	Ri	10
Initial angle	θ	18
N of Lagrangian points	N	64



Filamento Soggetto ad un Flusso Uniforme



Present simulation

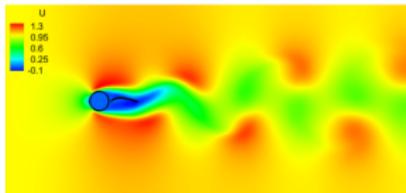
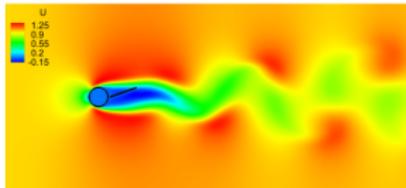
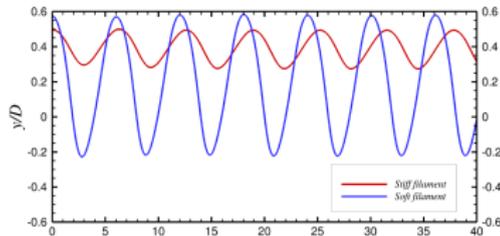


Experiments by Zhang et al.(2000)

Filament in a uniform flow

Length	L	1.0
filament density	ρ_s	1.5
Bending Stiffness	K_b	10^{-3}
Reynolds number	$\frac{UL}{\nu}$	200
Richardson number	Ri	0.5
Initial angle	θ	18
N of Lagrangian points	N	64

Filamento Incernierato Dietro ad un Cilindro 2D

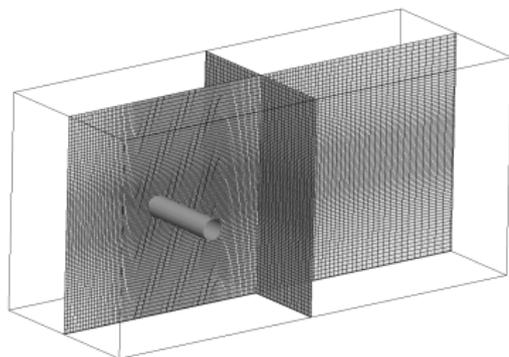


Hinged Filament behind a 2D Circular Cylinder

Length in x -direction	L_x	21
Length in y -direction	L_y	10
Filament Length	L	1.5
Cylinder diameter	D	1.0
filament density	ρ_s	0.1
Bending Stiffness	K_b	$5 \times 10^{-3}, 0.1$
Reynolds number	$\frac{UD}{\nu}$	100
Richardson number	Ri	0.0
Initial angle	θ	0
N of Lagrangian points	N	84

- La rottura di simmetria viene catturata correttamente dal codice
- Piccole differenze nella frequenza di oscillazione rispetto alla letteratura

Il Dominio di Calcolo



Domain setup

Domain size	$L_x \times L_y \times L_z$	$21.5 \times 10 \times 8$
N° of grid points	$N_x \times N_y \times N_z$	$482 \times 275 \times 98$
stretching factor in x -direction	r_x	1.005, 1.01
stretching factor in y -direction	r_y	1.01

Uniform box zone

Domain size	$l_x \times l_y \times l_z$	$4v \times 2 \times 8$
N° of grid points per diameter	Ne	40

- Griglia costituita da più di 12 milioni di celle
- una risoluzione elevata della griglia è necessaria per risolvere i filamenti in maniera adeguata
- I calcoli sono eseguiti in parallelo
- Le simulazione hanno una durata compresa tra i 15 e 20 giorni

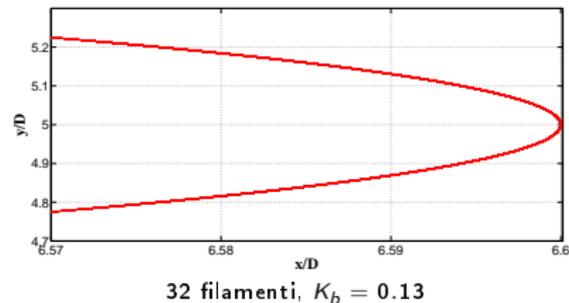
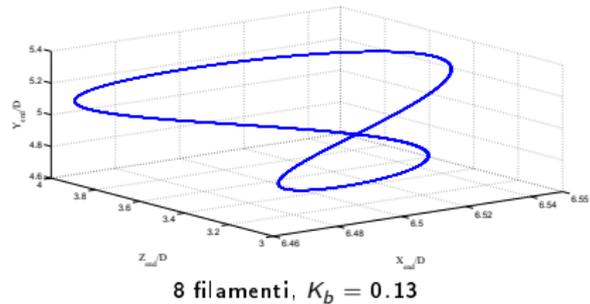
Come sono organizzate le simulazioni?

- I filamenti sono testati in due diverse configurazioni:
 - *sparsa*: 8 filamenti
 - *densa*: 32 filamenti
- Nelle simulazioni viene variata:
 - La rigidezza flessionale
 - La lunghezza dei filamenti

$$Re = \frac{UD}{\nu} = 200$$

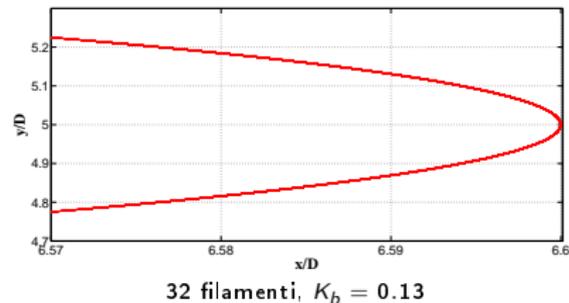
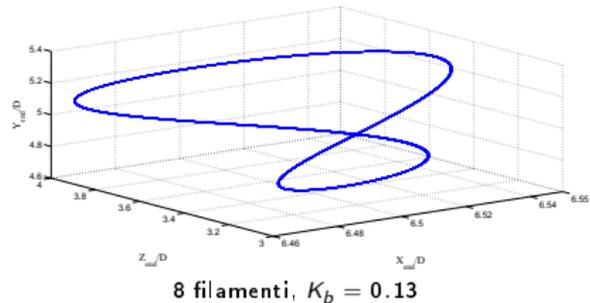
$L/D=1$

- I filamenti si muovono nella direzione z solo in configurazione *sparsa*
- I filamenti si muovono in fase nel piano $x-y$
- I filamenti in configurazione *densa* oscillano con minore ampiezza
- I filamenti si muovono trasversalmente a due a due in direzioni opposte



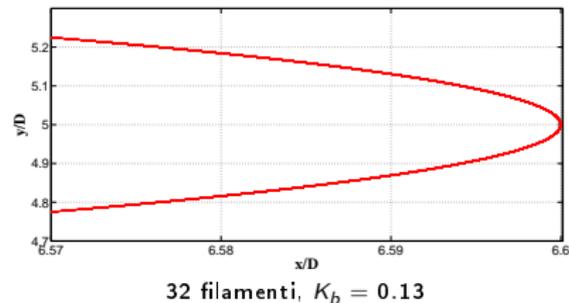
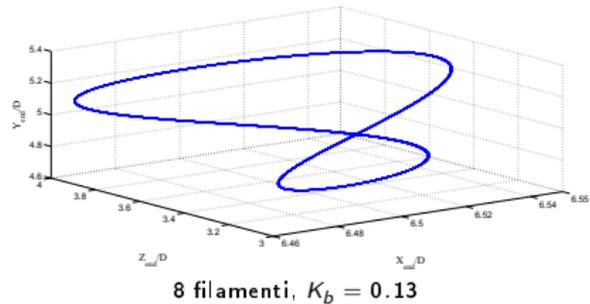
L/D=1

- I filamenti si muovono nella direzione z solo in configurazione *sparsa*
- I filamenti si muovono in fase nel piano x - y
- I filamenti in configurazione *densa* oscillano con minore ampiezza
- I filamenti si muovono trasversalmente a due a due in direzioni opposte



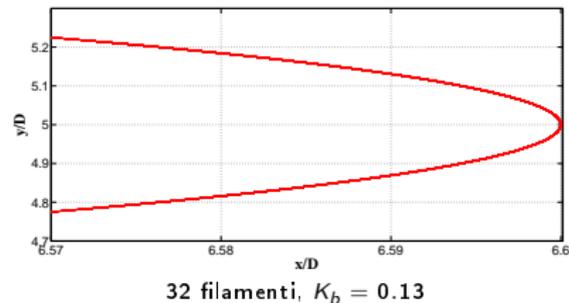
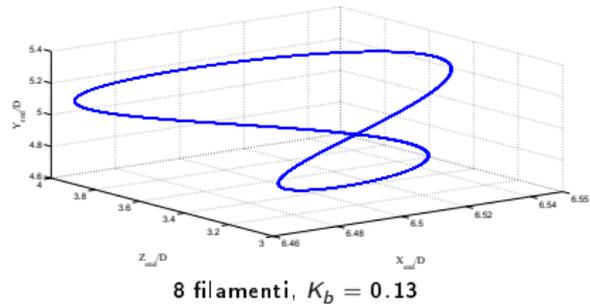
L/D=1

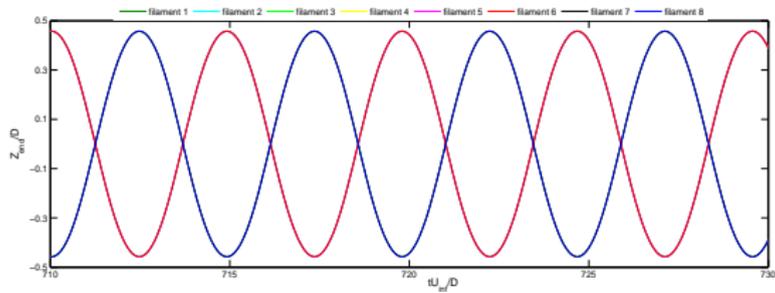
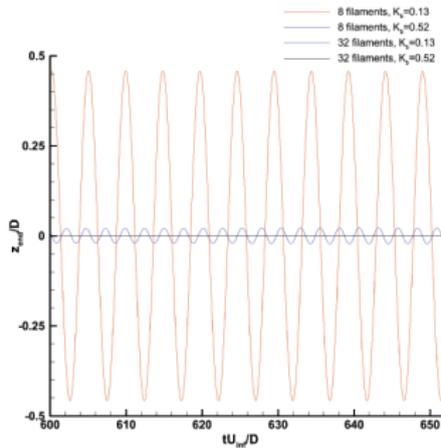
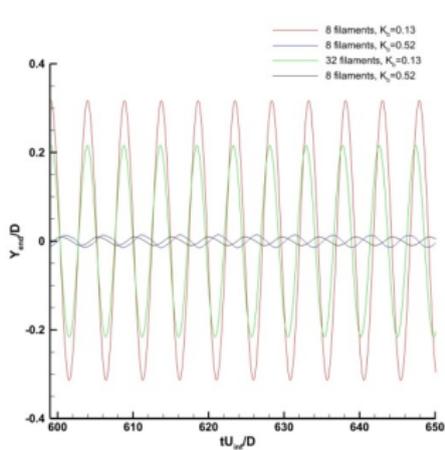
- I filamenti si muovono nella direzione z solo in configurazione *sparsa*
- I filamenti si muovono in fase nel piano x - y
- I filamenti in configurazione *densa* oscillano con minore ampiezza
- I filamenti si muovono trasversalmente a due a due in direzioni opposte



L/D=1

- I filamenti si muovono nella direzione z solo in configurazione *sparsa*
- I filamenti si muovono in fase nel piano x - y
- I filamenti in configurazione *densa* oscillano con minore ampiezza
- I filamenti si muovono trasversalmente a due a due in direzioni opposte



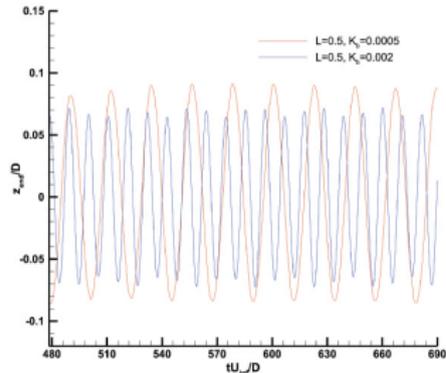
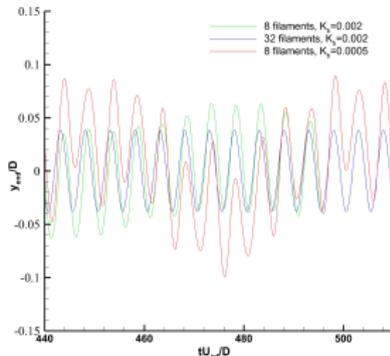




$L/D=0.5$

Rottura di simmetria?

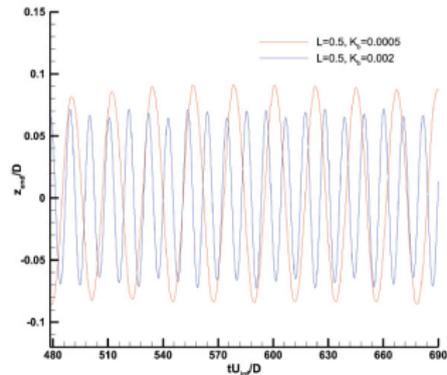
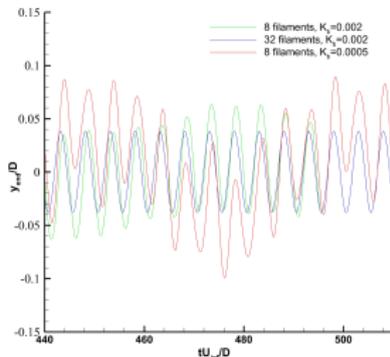
- In 2D la rottura di simmetria avviene per filamento sufficientemente corto
- In 3D questo processo potrebbe essere posticipato



$L/D=0.5$

Rottura di simmetria?

- In 2D la rottura di simmetria avviene per filamento sufficientemente corto
- In 3D questo processo potrebbe essere posticipato



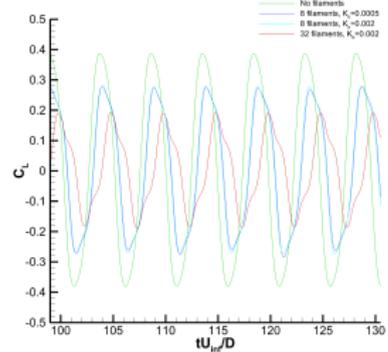
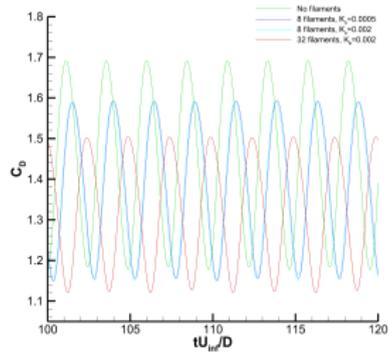
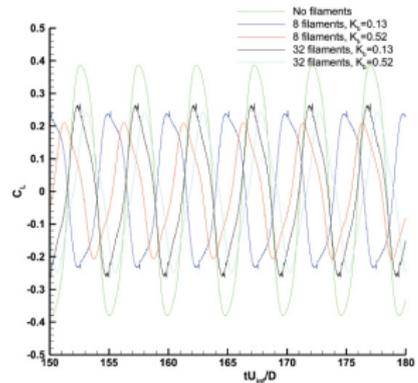
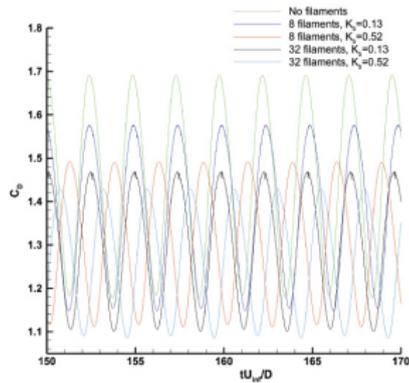
Coefficienti Aerodinamici

Le prestazioni aerodinamiche di un corpo si misurano con due coefficienti:

- $C_D = \frac{2F_x}{\rho_\infty U_\infty^2 S}$
- $C_L = \frac{2F_y}{\rho_\infty U_\infty^2 S}$

I coefficienti vengono calcolati mediante un bilancio integrale di quantità di moto sul dominio di calcolo

Che effetto hanno i filamenti?



Summary of the computed aerodynamics coefficients

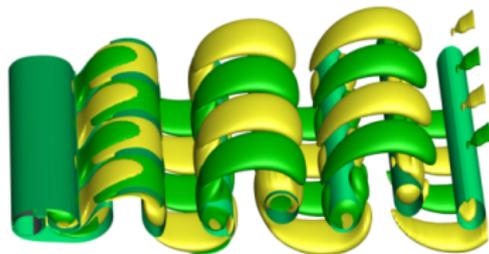
Case	L/D	K_b	$\overline{C_D}$	$\overline{C_L}$	$C'_{D_{rms}}$	$C'_{L_{rms}}$
No filaments	0.5	—	1.448	0.0	0.180	0.290
8 filaments	0.5	0.0005	1.387	0.0	0.155	0.200
8 filaments	0.5	0.002	1.388	0.0	0.155	0.201
32 filaments	0.5	0.002	1.326	0.0	0.122	0.173
8 filaments	1.0	0.13	1.343	0.0	0.133	0.228
8 filaments	1.0	0.52	1.315	0.0	0.147	0.216
32 filaments	1.0	0.13	1.296	0.0	0.128	0.173
32 filaments	1.0	0.52	1.268	0.0	0.120	0.157

● Riduzione del C_D fino al **12.5%**

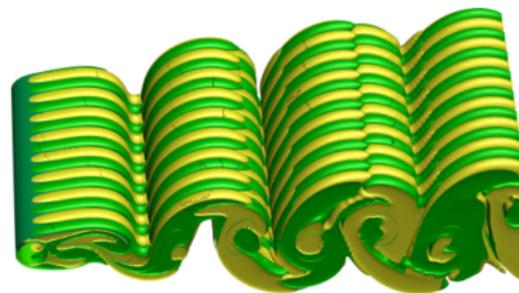
● Riduzione dell'ampiezza di oscillazione del C_L fino al **30%**

Struttura della Scia di un Cilindro

- La scia di un cilindro subisce numerose biforcazioni in funzione di Re
- Le biforcazioni tridimensionali a bassi Re sono due:



Modo A, $Re = 200$



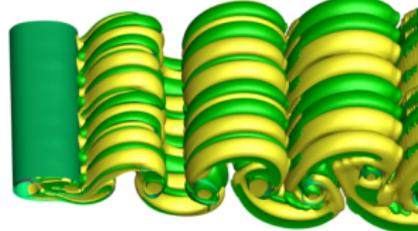
Modo B, $Re = 260$

Come agiscono i filamenti sulla struttura della scia?

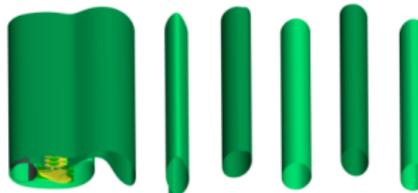
- La configurazione *sparsa* anticipa la seconda biforcazione tridimensionale
- La configurazione *sparsa* può interagire con l'instabilità tridimensionale cambiandone la lunghezza d'onda
- La configurazione *densa* inibisce il Modo A



8 filamenti, $K_b = 0.52$



8 filamenti, $K_b = 0.13$



32 filamenti, $K_b = 0.13$

Conclusioni

Il flusso su di un cilindro munito di appendici flessibili è stato simulato:

- Il codice è stato validato dimostrandosi in buon accordo con la letteratura
- I filamenti si muovono in tre dimensioni solo se sono sufficientemente spazati
- I filamenti controllano il flusso abbassando il C_D fino al 12.5% e l'ampiezza di oscillazione del C_L fino al 30%
- I filamenti interagiscono con le instabilità tridimensionali della scia, riconfigurandone la struttura

Sviluppi Futuri

- Validazione dei risultati con esperimenti
- Esplorare lo spazio dei parametri del filamento
- Testare i filamenti in regime turbolento
- Profili alari dotati di filamenti flessibili

Grazie per l'attenzione