

La fluidodinamica: cos'è e a cosa serve. Esempi tratti dalla vita di tutti i giorni e non.

Simone Zuccher

E-mail: zuccher@sci.univr.it

Web page: <http://profs.sci.univr.it/~zuccher/>

Liceo Scientifico "E. Medi" e
Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali – Università di Verona

Conferenze per i genitori degli studenti e non
11 Febbraio 2008

Outline

- 1 **Cos'è e a cosa serve?**
 - Alcune definizioni, esempi preliminari
 - Domande & risposte
 - Dove entra la fluidodinamica
- 2 **Il modello**
 - Le equazioni di Navier-Stokes
 - Difficoltà legate alle equazioni di Navier-Stokes
- 3 **Diversi approcci**
 - Experimental Fluid Dynamics
 - Analytical Fluid Dynamics
 - Computational Fluid Dynamics
- 4 **Esempi**
 - Alcuni esempi dalla vita di tutti i giorni (e non)

Outline

- 1 **Cos'è e a cosa serve?**
 - Alcune definizioni, esempi preliminari
 - Domande & risposte
 - Dove entra la fluidodinamica
- 2 **Il modello**
 - Le equazioni di Navier-Stokes
 - Difficoltà legate alle equazioni di Navier-Stokes
- 3 **Diversi approcci**
 - Experimental Fluid Dynamics
 - Analytical Fluid Dynamics
 - Computational Fluid Dynamics
- 4 **Esempi**
 - Alcuni esempi dalla vita di tutti i giorni (e non)

Outline

- 1 **Cos'è e a cosa serve?**
 - Alcune definizioni, esempi preliminari
 - Domande & risposte
 - Dove entra la fluidodinamica
- 2 **Il modello**
 - Le equazioni di Navier-Stokes
 - Difficoltà legate alle equazioni di Navier-Stokes
- 3 **Diversi approcci**
 - Experimental Fluid Dynamics
 - Analytical Fluid Dynamics
 - Computational Fluid Dynamics
- 4 **Esempi**
 - Alcuni esempi dalla vita di tutti i giorni (e non)

Outline

- 1 **Cos'è e a cosa serve?**
 - Alcune definizioni, esempi preliminari
 - Domande & risposte
 - Dove entra la fluidodinamica
- 2 **Il modello**
 - Le equazioni di Navier-Stokes
 - Difficoltà legate alle equazioni di Navier-Stokes
- 3 **Diversi approcci**
 - Experimental Fluid Dynamics
 - Analytical Fluid Dynamics
 - Computational Fluid Dynamics
- 4 **Esempi**
 - Alcuni esempi dalla vita di tutti i giorni (e non)

Outline

- 1 **Cos'è e a cosa serve?**
 - Alcune definizioni, esempi preliminari
 - Domande & risposte
 - Dove entra la fluidodinamica
- 2 Il modello
 - Le equazioni di Navier-Stokes
 - Difficoltà legate alle equazioni di Navier-Stokes
- 3 Diversi approcci
 - Experimental Fluid Dynamics
 - Analytical Fluid Dynamics
 - Computational Fluid Dynamics
- 4 Esempi
 - Alcuni esempi dalla vita di tutti i giorni (e non)

...partiamo dall'*abc*

Etimologia

Fluidodinamica: composto di *fluido* e *dinamica*.

Definizione di fluido

Si dice di qualsiasi sostanza che si presenti nello stato liquido o aeriforme. Qualsiasi sostanza allo stato fluido, in cui le molecole non hanno una posizione reciproca fissa.

...partiamo dall'*abc*

Etimologia

Fluidodinamica: composto di *fluido* e *dinamica*.

Definizione di dinamica

Parte della meccanica che studia il moto dei corpi in relazione alle forze che lo producono.

...partiamo dall'*abc*

Etimologia

Fluidodinamica: composto di *fluido* e *dinamica*.

Definizione di *fluido-dinamica*

Branca della fisica che studia il movimento dei fluidi.

Ok, ma in pratica?

Dal caffè e i biscotti...

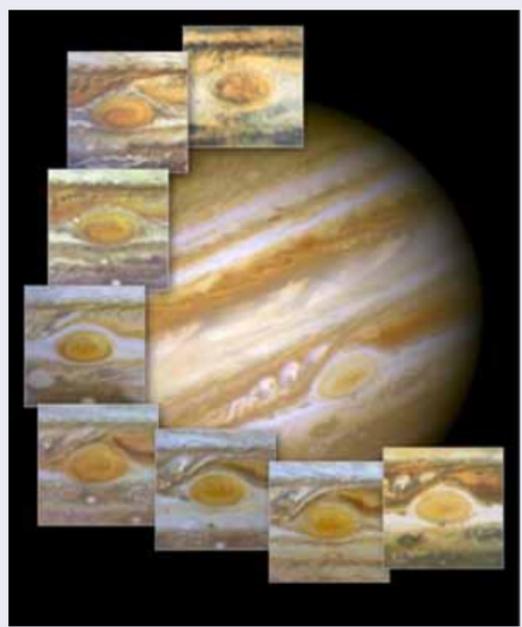


Ok, ma in pratica?

Dal caffè e i biscotti...



...alle tempeste di Giove



Outline

- 1 **Cos'è e a cosa serve?**
 - Alcune definizioni, esempi preliminari
 - **Domande & risposte**
 - Dove entra la fluidodinamica
- 2 Il modello
 - Le equazioni di Navier-Stokes
 - Difficoltà legate alle equazioni di Navier-Stokes
- 3 Diversi approcci
 - Experimental Fluid Dynamics
 - Analytical Fluid Dynamics
 - Computational Fluid Dynamics
- 4 Esempi
 - Alcuni esempi dalla vita di tutti i giorni (e non)

Domande/risposte (1/2)

D: Perché gli uccelli volano in formazione a "V"?



Domande/risposte (1/2)

D: Perché gli uccelli volano in formazione a "V"?



R: Perché sanno del "vortice di estrema"



Domande/risposte (2/2)

D: Perché la pallina da golf è piena di sfaccettature?

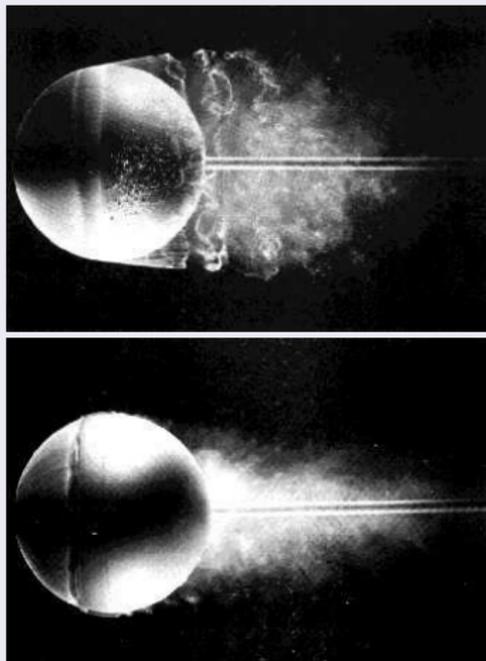


Domande/risposte (2/2)

D: Perché la pallina da golf è piena di sfaccettature?



R: Separazione del flusso (laminare/turbolento)



Outline

- 1 **Cos'è e a cosa serve?**
 - Alcune definizioni, esempi preliminari
 - Domande & risposte
 - **Dove entra la fluidodinamica**
- 2 Il modello
 - Le equazioni di Navier-Stokes
 - Difficoltà legate alle equazioni di Navier-Stokes
- 3 Diversi approcci
 - Experimental Fluid Dynamics
 - Analytical Fluid Dynamics
 - Computational Fluid Dynamics
- 4 Esempi
 - Alcuni esempi dalla vita di tutti i giorni (e non)

Meteorologia



Aerodinamica



Combustione

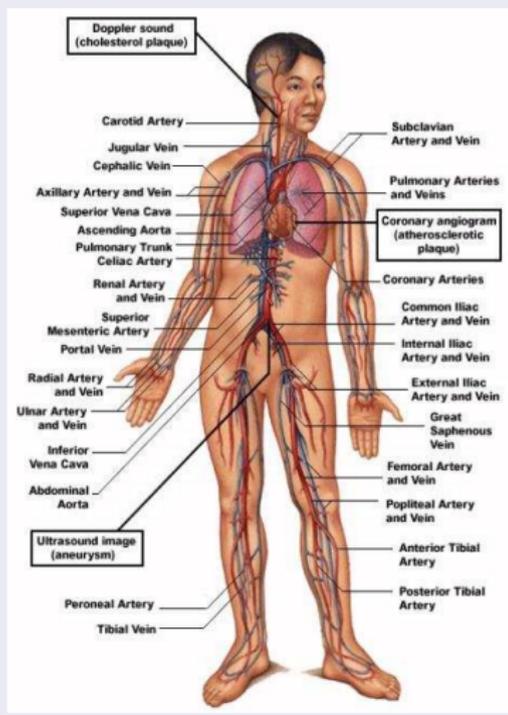


Geologia



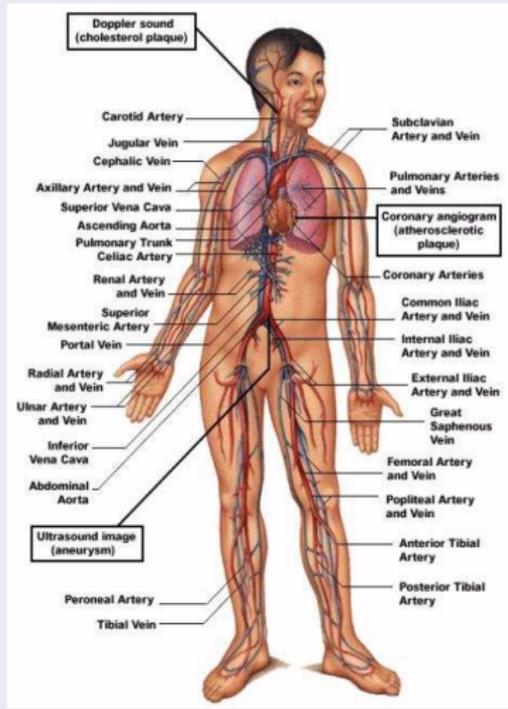
Bio-fluidodinamica

Fluidi umani

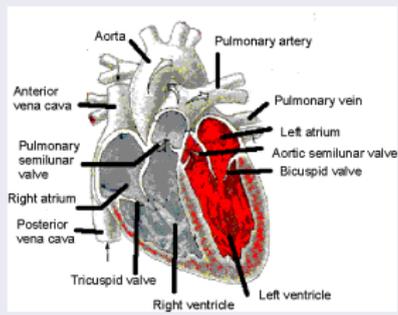


Bio-fluidodinamica

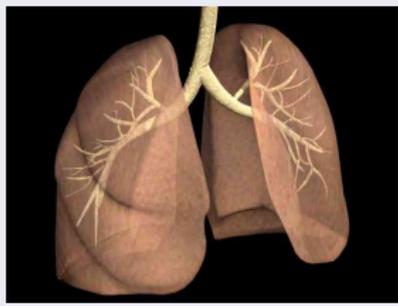
Fluidi umani



Emodinamica



Polmoni/aerosol



Outline

- 1 Cos'è e a cosa serve?
 - Alcune definizioni, esempi preliminari
 - Domande & risposte
 - Dove entra la fluidodinamica
- 2 **Il modello**
 - **Le equazioni di Navier-Stokes**
 - Difficoltà legate alle equazioni di Navier-Stokes
- 3 Diversi approcci
 - Experimental Fluid Dynamics
 - Analytical Fluid Dynamics
 - Computational Fluid Dynamics
- 4 Esempi
 - Alcuni esempi dalla vita di tutti i giorni (e non)

Le equazioni di Navier-Stokes

Conservazione della massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0$$

Conservazione della quantità di moto:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \otimes \mathbf{V}) + \nabla p = \nabla \cdot \mathbb{S}(\mathbf{V}) + \rho \mathbf{f}$$

Conservazione dell'energia:

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e \mathbf{V}) + p \nabla \cdot \mathbf{V} = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + \mathbb{S}(\mathbf{V}) : \mathbb{E}(\mathbf{V})$$

Equazioni di stato:

$$p = p(\mathbf{e}, \rho), \quad T = T(\mathbf{e}, \rho)$$

Le equazioni di Navier-Stokes

Conservazione della massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0$$

Conservazione della quantità di moto:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \otimes \mathbf{V}) + \nabla p = \nabla \cdot \mathbb{S}(\mathbf{V}) + \rho \mathbf{f}$$

Conservazione dell'energia:

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e \mathbf{V}) + p \nabla \cdot \mathbf{V} = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + \mathbb{S}(\mathbf{V}) : \mathbb{E}(\mathbf{V})$$

Equazioni di stato:

$$p = p(e, \rho), \quad T = T(e, \rho)$$

Le equazioni di Navier-Stokes

Conservazione della massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0$$

Conservazione della quantità di moto:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \otimes \mathbf{V}) + \nabla p = \nabla \cdot \mathbb{S}(\mathbf{V}) + \rho \mathbf{f}$$

Conservazione dell'energia:

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e \mathbf{V}) + p \nabla \cdot \mathbf{V} = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + \mathbb{S}(\mathbf{V}) : \mathbb{E}(\mathbf{V})$$

Equazioni di stato:

$$p = p(e, \rho), \quad T = T(e, \rho)$$

Le equazioni di Navier-Stokes

Conservazione della massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0$$

Conservazione della quantità di moto:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \otimes \mathbf{V}) + \nabla p = \nabla \cdot \mathbb{S}(\mathbf{V}) + \rho \mathbf{f}$$

Conservazione dell'energia:

$$\frac{\partial(\rho e)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho e \mathbf{V}) + p \nabla \cdot \mathbf{V} = \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + \mathbb{S}(\mathbf{V}) : \mathbb{E}(\mathbf{V})$$

Equazioni di stato:

$$p = p(\mathbf{e}, \rho), \quad T = T(\mathbf{e}, \rho)$$

Outline

- 1 Cos'è e a cosa serve?
 - Alcune definizioni, esempi preliminari
 - Domande & risposte
 - Dove entra la fluidodinamica
- 2 **Il modello**
 - Le equazioni di Navier-Stokes
 - **Difficoltà legate alle equazioni di Navier-Stokes**
- 3 Diversi approcci
 - Experimental Fluid Dynamics
 - Analytical Fluid Dynamics
 - Computational Fluid Dynamics
- 4 Esempi
 - Alcuni esempi dalla vita di tutti i giorni (e non)

Difficoltà legate alle equazioni di Navier-Stokes

- Nel Maggio 2000 il Clay Mathematics Institute (Cambridge, MA, USA) istituisce il *Millennium Prize*: un **milione di dollari** per ognuno dei sette problemi considerati **important classic questions that have resisted solution over the years**.

Tra questi, ci sono le equazioni di Navier-Stokes:

[...] Although these equations were written down in the 19th Century, our understanding of them remains minimal. The challenge is to make substantial progress toward a mathematical theory which will unlock the secrets hidden in the Navier-Stokes equations.

- Il premio per le equazioni di Navier-Stokes va a chi riesce a dimostrare:
 - Existence and smoothness of Navier-Stokes solutions on \mathbb{R}^3
 - Existence and smoothness of Navier-Stokes solutions on $\mathbb{R}^3 \setminus \mathbb{Z}^3$
 - Breakdown of Navier-Stokes solutions on \mathbb{R}^3
 - Breakdown of Navier-Stokes solutions on $\mathbb{R}^3 \setminus \mathbb{Z}^3$

Difficoltà legate alle equazioni di Navier-Stokes

- Nel Maggio 2000 il Clay Mathematics Institute (Cambridge, MA, USA) istituisce il *Millennium Prize*: un **milione di dollari** per ognuno dei sette problemi considerati **important classic questions that have resisted solution over the years**.

Tra questi, ci sono le equazioni di Navier-Stokes:

[...] Although these equations were written down in the 19th Century, our understanding of them remains minimal. The challenge is to make substantial progress toward a mathematical theory which will unlock the secrets hidden in the Navier-Stokes equations.

- Il premio per le equazioni di Navier-Stokes va a chi riesce a dimostrare:
 - Existence and smoothness of Navier-Stokes solutions on \mathbb{R}^3
 - Existence and smoothness of Navier-Stokes solutions on $\mathbb{R}^3 \setminus \mathbb{Z}^3$
 - Breakdown of Navier-Stokes solutions on \mathbb{R}^3
 - Breakdown of Navier-Stokes solutions on $\mathbb{R}^3 \setminus \mathbb{Z}^3$

Difficoltà legate alle equazioni di Navier-Stokes

- Nel Maggio 2000 il Clay Mathematics Institute (Cambridge, MA, USA) istituisce il *Millennium Prize*: un **milione di dollari** per ognuno dei sette problemi considerati **important classic questions that have resisted solution over the years**.

Tra questi, ci sono le equazioni di Navier-Stokes:

[...] Although these equations were written down in the 19th Century, our understanding of them remains minimal. The challenge is to make substantial progress toward a mathematical theory which will unlock the secrets hidden in the Navier-Stokes equations.

- **Il premio per le equazioni di Navier-Stokes** va a chi riesce a dimostrare:
 - Existence and smoothness of Navier-Stokes solutions on \mathbb{R}^3
 - Existence and smoothness of Navier-Stokes solutions on $\mathbb{R}^3 \setminus \mathbb{Z}^3$
 - Breakdown of Navier-Stokes solutions on \mathbb{R}^3
 - Breakdown of Navier-Stokes solutions on $\mathbb{R}^3 \setminus \mathbb{Z}^3$

Difficoltà legate alle equazioni di Navier-Stokes

- Nel Maggio 2000 il Clay Mathematics Institute (Cambridge, MA, USA) istituisce il *Millennium Prize*: un **milione di dollari** per ognuno dei sette problemi considerati **important classic questions that have resisted solution over the years**.

Tra questi, ci sono le equazioni di Navier-Stokes:

[...] Although these equations were written down in the 19th Century, our understanding of them remains minimal. The challenge is to make substantial progress toward a mathematical theory which will unlock the secrets hidden in the Navier-Stokes equations.

- **Il premio per le equazioni di Navier-Stokes** va a chi riesce a dimostrare:
 - Existence and smoothness of Navier-Stokes solutions on \mathbb{R}^3
 - Existence and smoothness of Navier-Stokes solutions on $\mathbb{R}^3 \setminus \mathbb{Z}^3$
 - Breakdown of Navier-Stokes solutions on \mathbb{R}^3
 - Breakdown of Navier-Stokes solutions on $\mathbb{R}^3 \setminus \mathbb{Z}^3$

Difficoltà legate alle equazioni di Navier-Stokes

- Nel Maggio 2000 il Clay Mathematics Institute (Cambridge, MA, USA) istituisce il *Millennium Prize*: un **milione di dollari** per ognuno dei sette problemi considerati **important classic questions that have resisted solution over the years**.

Tra questi, ci sono le equazioni di Navier-Stokes:

[...] Although these equations were written down in the 19th Century, our understanding of them remains minimal. The challenge is to make substantial progress toward a mathematical theory which will unlock the secrets hidden in the Navier-Stokes equations.

- **Il premio per le equazioni di Navier-Stokes** va a chi riesce a dimostrare:
 - Existence and smoothness of Navier-Stokes solutions on \mathbb{R}^3
 - Existence and smoothness of Navier-Stokes solutions on $\mathbb{R}^3 \setminus \mathbb{Z}^3$
 - Breakdown of Navier-Stokes solutions on \mathbb{R}^3
 - Breakdown of Navier-Stokes solutions on $\mathbb{R}^3 \setminus \mathbb{Z}^3$

Difficoltà legate alle equazioni di Navier-Stokes

- Nel Maggio 2000 il Clay Mathematics Institute (Cambridge, MA, USA) istituisce il *Millennium Prize*: un **milione di dollari** per ognuno dei sette problemi considerati **important classic questions that have resisted solution over the years**.

Tra questi, ci sono le equazioni di Navier-Stokes:

[...] Although these equations were written down in the 19th Century, our understanding of them remains minimal. The challenge is to make substantial progress toward a mathematical theory which will unlock the secrets hidden in the Navier-Stokes equations.

- **Il premio per le equazioni di Navier-Stokes** va a chi riesce a dimostrare:
 - Existence and smoothness of Navier-Stokes solutions on \mathbb{R}^3
 - Existence and smoothness of Navier-Stokes solutions on $\mathbb{R}^3 \setminus \mathbb{Z}^3$
 - Breakdown of Navier-Stokes solutions on \mathbb{R}^3
 - Breakdown of Navier-Stokes solutions on $\mathbb{R}^3 \setminus \mathbb{Z}^3$

Difficoltà legate alle equazioni di Navier-Stokes

- Nel Maggio 2000 il Clay Mathematics Institute (Cambridge, MA, USA) istituisce il *Millennium Prize*: un **milione di dollari** per ognuno dei sette problemi considerati **important classic questions that have resisted solution over the years**.

Tra questi, ci sono le equazioni di Navier-Stokes:

[...] Although these equations were written down in the 19th Century, our understanding of them remains minimal. The challenge is to make substantial progress toward a mathematical theory which will unlock the secrets hidden in the Navier-Stokes equations.

- **Il premio per le equazioni di Navier-Stokes** va a chi riesce a dimostrare:
 - Existence and smoothness of Navier-Stokes solutions on \mathbb{R}^3
 - Existence and smoothness of Navier-Stokes solutions on $\mathbb{R}^3 \setminus \mathbb{Z}^3$
 - Breakdown of Navier-Stokes solutions on \mathbb{R}^3
 - Breakdown of Navier-Stokes solutions on $\mathbb{R}^3 \setminus \mathbb{Z}^3$

Approcci alternativi

...le equazioni di NS sono molto complesse, ma noi vogliamo comunque risolvere dei problemi pratici (aerodinamica, combustione, etc.). Quali alternative?

- **Experimental Fluid Dynamics (EFD)**: risolviamo direttamente le equazioni “in natura”. **Problema**: costi, pericolosità, isolare solo ciò che interessa.
- **Analytical Fluid Dynamics (AFD)**: semplifichiamo le equazioni fino a quando siamo in grado di risolverle in modo agevole (o quasi). **Problema**: che termini “scarto”? Spesso passaggi elaborati.
- **Computational Fluid Dynamics (CFD)**: risolviamo numericamente con più o meno “forza bruta” le equazioni di Navier-Stokes. **Problema**: per problemi veri costo computazionale elevatissimo, praticamente impossibile.

Approcci alternativi

...le equazioni di NS sono molto complesse, ma noi vogliamo comunque risolvere dei problemi pratici (aerodinamica, combustione, etc.). Quali alternative?

- **Experimental Fluid Dynamics (EFD)**: risolviamo direttamente le equazioni “in natura”. **Problema**: costi, pericolosità, isolare solo ciò che interessa.
- **Analytical Fluid Dynamics (AFD)**: semplifichiamo le equazioni fino a quando siamo in grado di risolverle in modo agevole (o quasi). **Problema**: che termini “scarto”? Spesso passaggi elaborati.
- **Computational Fluid Dynamics (CFD)**: risolviamo numericamente con più o meno “forza bruta” le equazioni di Navier-Stokes. **Problema**: per problemi veri costo computazionale elevatissimo, praticamente impossibile.

Approcci alternativi

...le equazioni di NS sono molto complesse, ma noi vogliamo comunque risolvere dei problemi pratici (aerodinamica, combustione, etc.). Quali alternative?

- **Experimental Fluid Dynamics (EFD)**: risolviamo direttamente le equazioni “in natura”. **Problema**: costi, pericolosità, isolare solo ciò che interessa.
- **Analytical Fluid Dynamics (AFD)**: semplifichiamo le equazioni fino a quando siamo in grado di risolverle in modo agevole (o quasi). **Problema**: che termini “scarto”? Spesso passaggi elaborati.
- **Computational Fluid Dynamics (CFD)**: risolviamo numericamente con più o meno “forza bruta” le equazioni di Navier-Stokes. **Problema**: per problemi veri costo computazionale elevatissimo, praticamente impossibile.

Approcci alternativi

...le equazioni di NS sono molto complesse, ma noi vogliamo comunque risolvere dei problemi pratici (aerodinamica, combustione, etc.). Quali alternative?

- **Experimental Fluid Dynamics (EFD)**: risolviamo direttamente le equazioni “in natura”. **Problema**: costi, pericolosità, isolare solo ciò che interessa.
- **Analytical Fluid Dynamics (AFD)**: semplifichiamo le equazioni fino a quando siamo in grado di risolverle in modo agevole (o quasi). **Problema**: che termini “scarto”? Spesso passaggi elaborati.
- **Computational Fluid Dynamics (CFD)**: risolviamo numericamente con più o meno “forza bruta” le equazioni di Navier-Stokes. **Problema**: per problemi veri costo computazionale elevatissimo, praticamente impossibile.

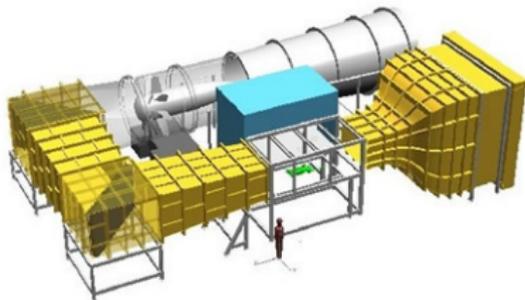
Outline

- 1 Cos'è e a cosa serve?
 - Alcune definizioni, esempi preliminari
 - Domande & risposte
 - Dove entra la fluidodinamica
- 2 Il modello
 - Le equazioni di Navier-Stokes
 - Difficoltà legate alle equazioni di Navier-Stokes
- 3 **Diversi approcci**
 - **Experimental Fluid Dynamics**
 - Analytical Fluid Dynamics
 - Computational Fluid Dynamics
- 4 Esempi
 - Alcuni esempi dalla vita di tutti i giorni (e non)

Esperimenti e facilities (1/2)

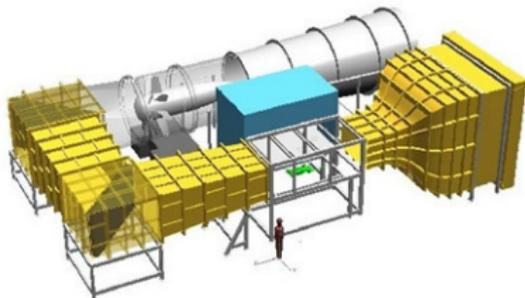


Esperimenti e facilities (2/2)



- Obiettivo: costruire un apparato (=facility + modello) per **riprodurre la fisica del problema reale**.
- **Gallerie del vento** a bassa velocità, alta velocità, transoniche, supersoniche, ipersoniche, criogeniche, orizzontali o verticali, di piccole o grandi dimensioni.
- **Gallerie “ad acqua”** (= bassa velocità).
- Vasche per problemi di idrodinamica.

Esperimenti e facilities (2/2)



- Obiettivo: costruire un apparato (=facility + modello) per **riprodurre la fisica del problema reale**.
- **Gallerie del vento** a bassa velocità, alta velocità, transoniche, supersoniche, ipersoniche, criogeniche, orizzontali o verticali, di piccole o grandi dimensioni.
- **Gallerie “ad acqua”** (= bassa velocità).
- **Vasche** per problemi di idrodinamica.

Outline

- 1 Cos'è e a cosa serve?
 - Alcune definizioni, esempi preliminari
 - Domande & risposte
 - Dove entra la fluidodinamica
- 2 Il modello
 - Le equazioni di Navier-Stokes
 - Difficoltà legate alle equazioni di Navier-Stokes
- 3 **Diversi approcci**
 - Experimental Fluid Dynamics
 - **Analytical Fluid Dynamics**
 - Computational Fluid Dynamics
- 4 Esempi
 - Alcuni esempi dalla vita di tutti i giorni (e non)

Fluidodinamica analitica



Soluzioni note in forma chiusa

- Per **geometrie semplici** e **flussi laminari** le equazioni di NS si semplificano di molto (parecchi termini nulli, altri trascurabili) e permettono **soluzione in forma chiusa**.
- **Esempio:** flusso tra **due lastre infinite e parallele**, a distanza h , di cui una è ferma e l'altra trascinata con velocità V .
Le equazioni di NS si riducono a $\frac{d^2 u}{dy^2} = 0$ con condizioni al contorno $u = 0$ per $y = 0$ e $u = V$ per $y = h$. Integrando 2 volte si ottiene $u(y) = V \frac{y}{h}$.
- Per **integrare le equazioni semplificate** spesso sono necessari passaggi laboriosi, cambi di variabili, etc. (= **la soluzione non è immediata**).

Soluzioni note in forma chiusa

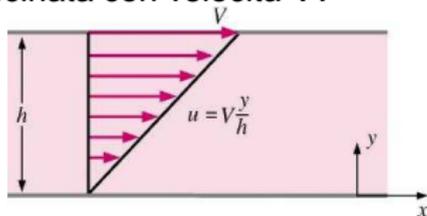
- Per **geometrie semplici** e **flussi laminari** le equazioni di NS si semplificano di molto (parecchi termini nulli, altri trascurabili) e permettono **soluzione in forma chiusa**.
- **Esempio:** flusso tra **due lastre infinite e parallele**, a distanza h , di cui una è ferma e l'altra trascinata con velocità V .

Le equazioni di NS si riducono a $\frac{d^2 u}{dy^2} = 0$ con condizioni al contorno $u = 0$ per $y = 0$ e $u = V$ per $y = h$. Integrando 2 volte si ottiene $u(y) = V \frac{y}{h}$.

- Per **integrare le equazioni semplificate** spesso sono necessari passaggi laboriosi, cambi di variabili, etc. (= **la soluzione non è immediata**).

Soluzioni note in forma chiusa

- Per **geometrie semplici** e **flussi laminari** le equazioni di NS si semplificano di molto (parecchi termini nulli, altri trascurabili) e permettono **soluzione in forma chiusa**.
- **Esempio**: flusso tra **due lastre infinite e parallele**, a distanza h , di cui una è ferma e l'altra trascinata con velocità V .

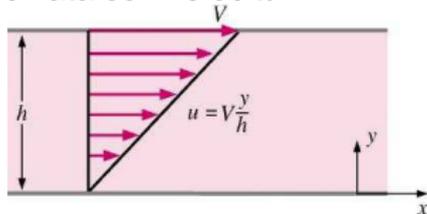


Le equazioni di NS si riducono a $\frac{d^2 u}{dy^2} = 0$ con condizioni al contorno $u = 0$ per $y = 0$ e $u = V$ per $y = h$. Integrando 2 volte si ottiene $u(y) = V \frac{y}{h}$.

- Per **integrare le equazioni semplificate** spesso sono necessari passaggi laboriosi, cambi di variabili, etc. (= **la soluzione non è immediata**).

Soluzioni note in forma chiusa

- Per **geometrie semplici** e **flussi laminari** le equazioni di NS si semplificano di molto (parecchi termini nulli, altri trascurabili) e permettono **soluzione in forma chiusa**.
- **Esempio**: flusso tra **due lastre infinite e parallele**, a distanza h , di cui una è ferma e l'altra trascinata con velocità V .

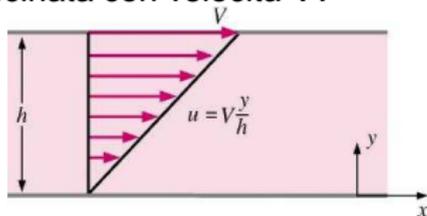


Le equazioni di NS si riducono a $\frac{d^2 u}{dy^2} = 0$ con condizioni al contorno $u = 0$ per $y = 0$ e $u = V$ per $y = h$. Integrando 2 volte si ottiene $u(y) = V \frac{y}{h}$.

- Per **integrare le equazioni semplificate** spesso sono necessari passaggi laboriosi, cambi di variabili, etc. (= **la soluzione non è immediata**).

Soluzioni note in forma chiusa

- Per **geometrie semplici** e **flussi laminari** le equazioni di NS si semplificano di molto (parecchi termini nulli, altri trascurabili) e permettono **soluzione in forma chiusa**.
- **Esempio**: flusso tra **due lastre infinite e parallele**, a distanza h , di cui una è ferma e l'altra trascinata con velocità V .



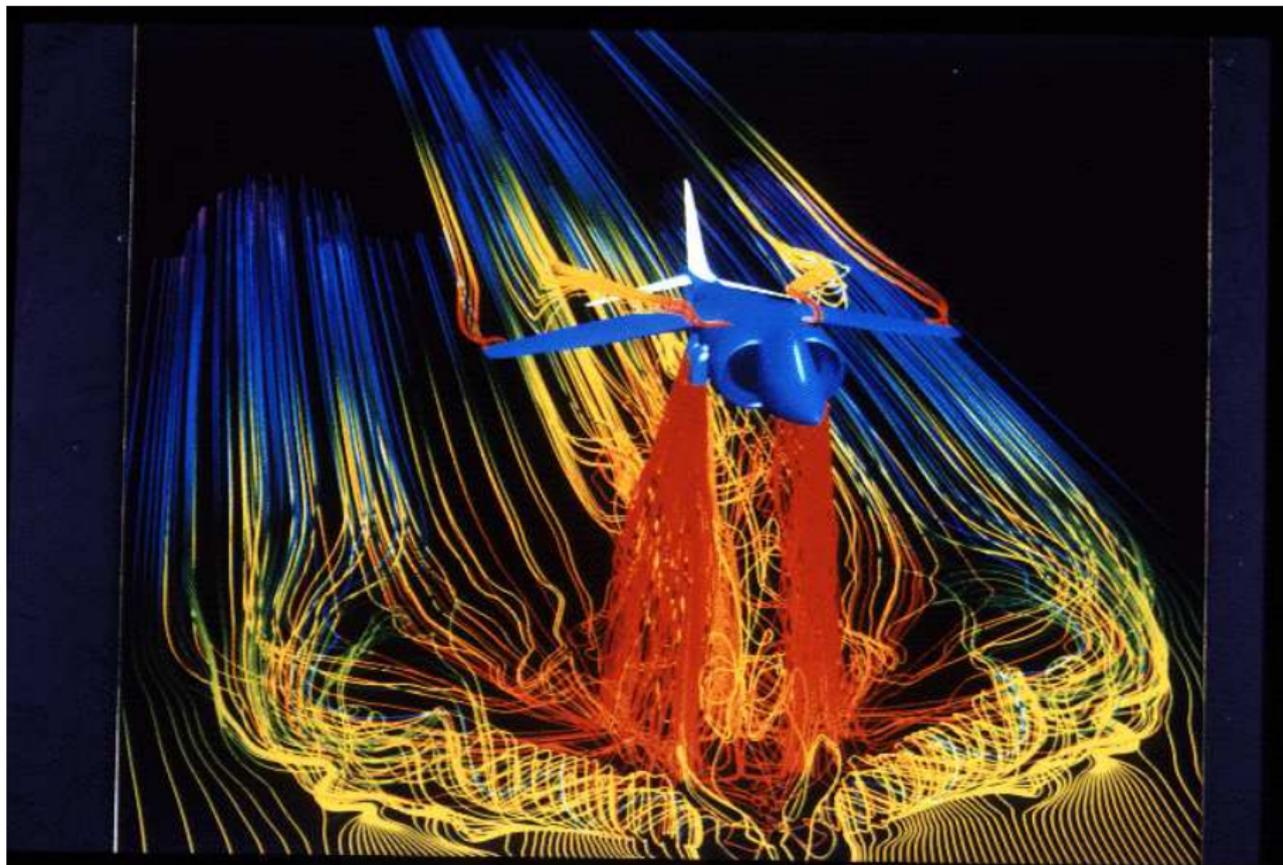
Le equazioni di NS si riducono a $\frac{d^2 u}{dy^2} = 0$ con condizioni al contorno $u = 0$ per $y = 0$ e $u = V$ per $y = h$. Integrando 2 volte si ottiene $u(y) = V \frac{y}{h}$.

- Per **integrare le equazioni semplificate** spesso sono necessari passaggi laboriosi, cambi di variabili, etc. (= **la soluzione non è immediata**).

Outline

- 1 Cos'è e a cosa serve?
 - Alcune definizioni, esempi preliminari
 - Domande & risposte
 - Dove entra la fluidodinamica
- 2 Il modello
 - Le equazioni di Navier-Stokes
 - Difficoltà legate alle equazioni di Navier-Stokes
- 3 **Diversi approcci**
 - Experimental Fluid Dynamics
 - Analytical Fluid Dynamics
 - **Computational Fluid Dynamics**
- 4 Esempi
 - Alcuni esempi dalla vita di tutti i giorni (e non)

Fluidodinamica numerica (1/2)



Fluidodinamica numerica (2/2)

- Branca della fluidodinamica che utilizza **metodi numerici**, **potenza di calcolo** e **algoritmi efficienti** per risolvere ed analizzare **problemi pratici** di interesse ingegneristico.
- Limite: anche con equazioni semplificate e supercomputer ad alta velocità, **solo soluzioni approssimate**. Per geometrie complesse, soluzione dettagliata ancora impossibile (per esempio del flusso completo attorno ad un velivolo). La **validazione** del codice avviene tramite gli **esperimenti**.
- Quando le lunghezze caratteristiche del fenomeno hanno uno spettro molto ampio (turbolenza) la **soluzione numerica** diventa **problematica** perchè la **griglia** deve essere sufficientemente **raffinata** da catturare tutti i fenomeni connessi.

Fluidodinamica numerica (2/2)

- Branca della fluidodinamica che utilizza **metodi numerici**, **potenza di calcolo** e **algoritmi efficienti** per risolvere ed analizzare **problemi pratici** di interesse ingegneristico.
- Limite: anche con equazioni semplificate e supercomputer ad alta velocità, **solo soluzioni approssimate**. Per geometrie complesse, soluzione dettagliata ancora impossibile (per esempio del flusso completo attorno ad un velivolo). La **validazione** del codice avviene tramite gli **esperimenti**.
- Quando le lunghezze caratteristiche del fenomeno hanno uno spettro molto ampio (turbolenza) la **soluzione numerica** diventa **problematica** perchè la **griglia** deve essere sufficientemente **raffinata** da catturare tutti i fenomeni connessi.

Fluidodinamica numerica (2/2)

- Branca della fluidodinamica che utilizza **metodi numerici**, **potenza di calcolo** e **algoritmi efficienti** per risolvere ed analizzare **problemi pratici** di interesse ingegneristico.
- Limite: anche con equazioni semplificate e supercomputer ad alta velocità, **solo soluzioni approssimate**. Per geometrie complesse, soluzione dettagliata ancora impossibile (per esempio del flusso completo attorno ad un velivolo). La **validazione** del codice avviene tramite gli **esperimenti**.
- Quando le lunghezze caratteristiche del fenomeno hanno uno spettro molto ampio (turbolenza) la **soluzione numerica** diventa **problematica** perchè la **griglia** deve essere sufficientemente **raffinata** da catturare tutti i fenomeni connessi.

Come se non bastasse...

...facciamoci del male:

- In molti casi (e.g. combustione) è necessario risolvere **simultaneamente alle equazioni di Navier-Stokes altre equazioni** (tipicamente di convezione/diffusione). Queste possono descrivere reazioni chimiche, la concentrazione delle specie, scambi di calore complessi, etc.
- Si vorrebbero simulare **flussi multifase** (presenza di fase liquida/gassosa, solida/gassosa o liquida/solida), **fluidi non-Newtoniani** (sangue), etc.
- Insomma... la questione della soluzione numerica delle equazioni di Navier-Stokes nei casi di interesse pratico (ingegneristico) è **piuttosto complessa** e non c'è limite al peggio...

Come se non bastasse...

...facciamoci del male:

- In molti casi (e.g. combustione) è necessario risolvere **simultaneamente alle equazioni di Navier-Stokes altre equazioni** (tipicamente di convezione/diffusione). Queste possono descrivere reazioni chimiche, la concentrazione delle specie, scambi di calore complessi, etc.
- Si vorrebbero simulare **flussi multifase** (presenza di fase liquida/gassosa, solida/gassosa o liquida/solida), **fluidi non-Newtoniani** (sangue), etc.
- Insomma... la questione della soluzione numerica delle equazioni di Navier-Stokes nei casi di interesse pratico (ingegneristico) è **piuttosto complessa** e non c'è limite al peggio...

Come se non bastasse...

...facciamoci del male:

- In molti casi (e.g. combustione) è necessario risolvere **simultaneamente alle equazioni di Navier-Stokes altre equazioni** (tipicamente di convezione/diffusione). Queste possono descrivere reazioni chimiche, la concentrazione delle specie, scambi di calore complessi, etc.
- Si vorrebbero simulare **flussi multifase** (presenza di fase liquida/gassosa, solida/gassosa o liquida/solida), **fluidi non-Newtoniani** (sangue), etc.
- Insomma... la questione della soluzione numerica delle equazioni di Navier-Stokes nei casi di interesse pratico (ingegneristico) è **piuttosto complessa** e non c'è limite al peggio...

Come se non bastasse...

...facciamoci del male:

- In molti casi (e.g. combustione) è necessario risolvere **simultaneamente alle equazioni di Navier-Stokes altre equazioni** (tipicamente di convezione/diffusione). Queste possono descrivere reazioni chimiche, la concentrazione delle specie, scambi di calore complessi, etc.
- Si vorrebbero simulare **flussi multifase** (presenza di fase liquida/gassosa, solida/gassosa o liquida/solida), **fluidi non-Newtoniani** (sangue), etc.
- Insomma... la questione della soluzione numerica delle equazioni di Navier-Stokes nei casi di interesse pratico (ingegneristico) è **piuttosto complessa** e non c'è limite al peggio...

Outline

- 1 Cos'è e a cosa serve?
 - Alcune definizioni, esempi preliminari
 - Domande & risposte
 - Dove entra la fluidodinamica
- 2 Il modello
 - Le equazioni di Navier-Stokes
 - Difficoltà legate alle equazioni di Navier-Stokes
- 3 Diversi approcci
 - Experimental Fluid Dynamics
 - Analytical Fluid Dynamics
 - Computational Fluid Dynamics
- 4 **Esempi**
 - Alcuni esempi dalla vita di tutti i giorni (e non)

Per strada...



In cucina...



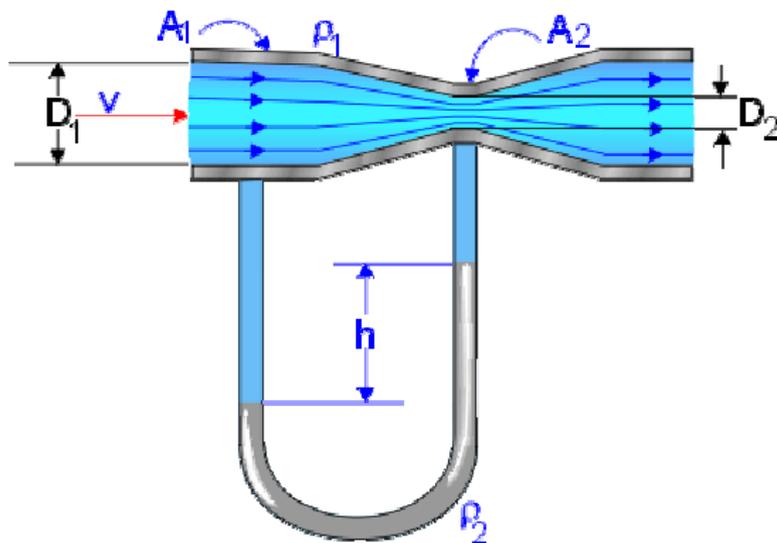
Per le pulizie...



In giardino...



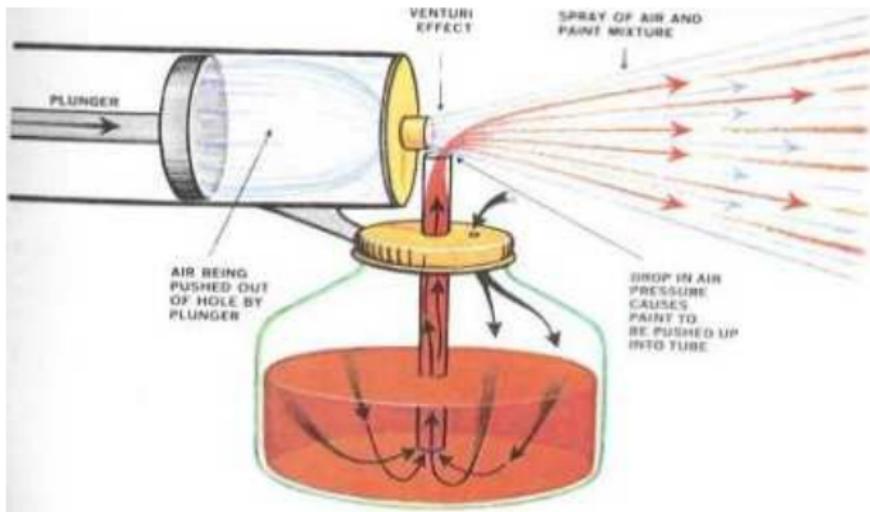
Effetto Venturi



Per verniciare...



Svelato il trucco...



In cantina...



In caduta libera...



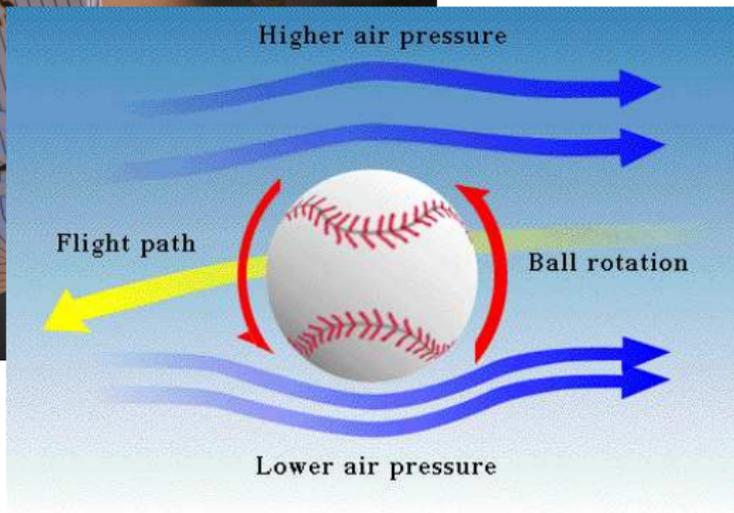
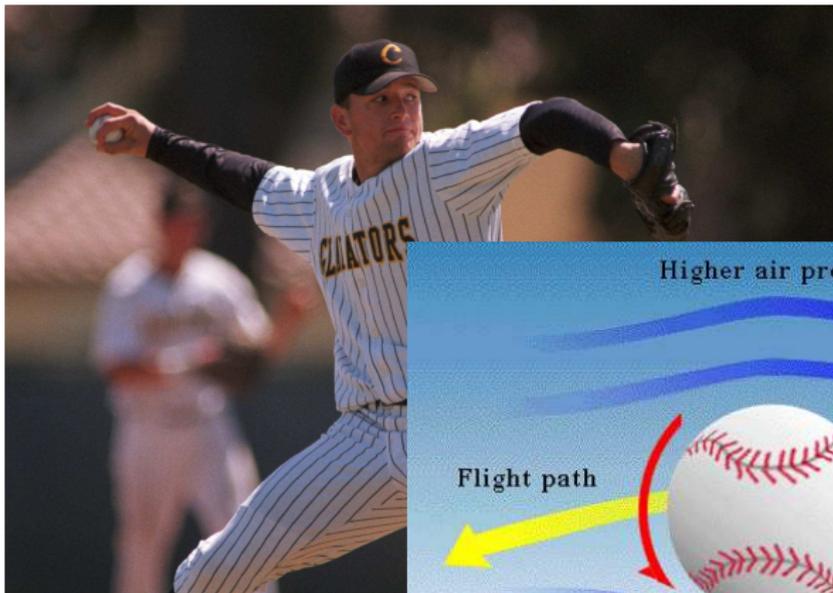
Sugli sci...



Palle ad effetto...



...svelato il trucco



In mare...



Cos'è e a cosa serve?
oooooooooooooooooooo

Il modello
oooo

Diversi approcci
oooooooooooo

Esempi
oooooooo

In mare...



In acqua...



Cos'è e a cosa serve?
oooooooooooooooooooo

Il modello
ooooo

Diversi approcci
oooooooooooo

Esempi
ooooooo

In bici...



In pista...



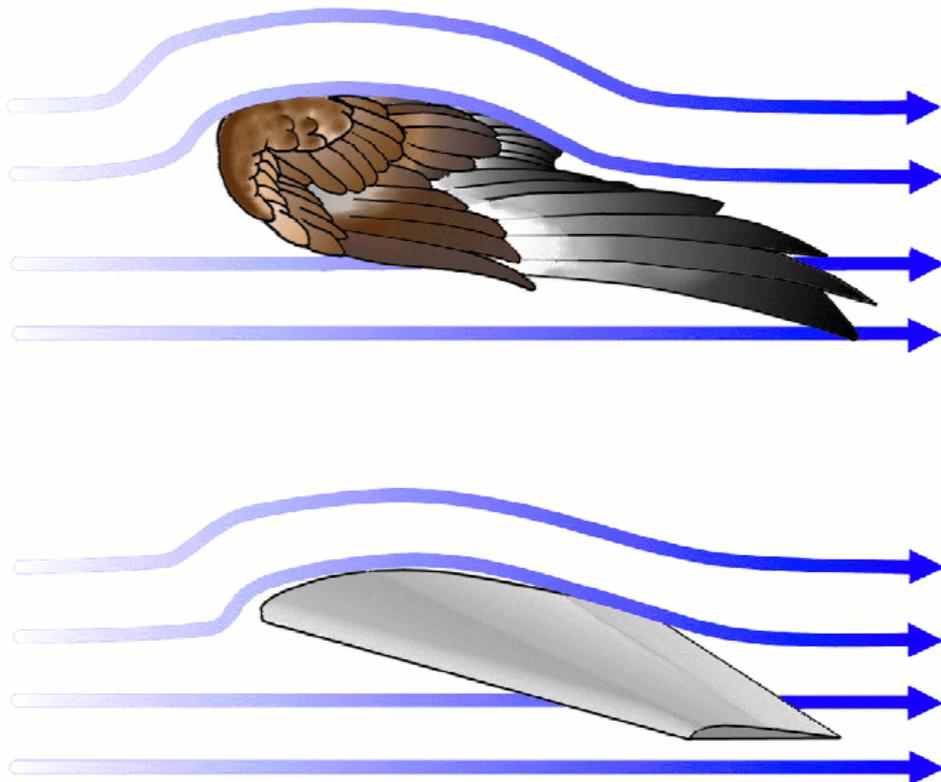
In pista...



In volo...



Si, ma come fa?



In volo...



In volo...



In volo...



Conclusioni

La fluidodinamica è:

- **bella**
- interessante
- intrigante
- affascinante
- utile
- quasi onnipresente

Conclusioni

La fluidodinamica è:

- **bella**
- **interessante**
- intrigante
- affascinante
- utile
- quasi onnipresente

Conclusioni

La fluidodinamica è:

- **bella**
- **interessante**
- **intrigante**
- affascinante
- utile
- quasi onnipresente

Conclusioni

La fluidodinamica è:

- **bella**
- **interessante**
- **intrigante**
- **affascinante**
- utile
- quasi onnipresente

Conclusioni

La fluidodinamica è:

- **bella**
- **interessante**
- **intrigante**
- **affascinante**
- **utile**
- quasi onnipresente

Conclusioni

La fluidodinamica è:

- **bella**
- **interessante**
- **intrigante**
- **affascinante**
- **utile**
- **quasi onnipresente**

Domande?

