

Prof. V. Armenio



Università di Trieste, Piazzale Europa 1, 34127 Trieste

Introduzione al corso di Meccanica dei Fluidi

Cos'è e a cosa serve?



Claude-Louis Navier

(10 Febbraio 1785 – 21 Agosto 1836)



Sir George Gabriel Stokes

(13 Agosto 1819 – 1 Febbraio 1903)



Testo di riferimento:
Meccanica dei fluidi
(Y.A.Cengel, J.M. Cimbala
Ed. It. G. Cozzo e C. Santoro

Alcune figure contenute in queste slides sono prese dal testo di riferimento per scopi didattici



...partiamo dall'*abc*

Definizione di fluido

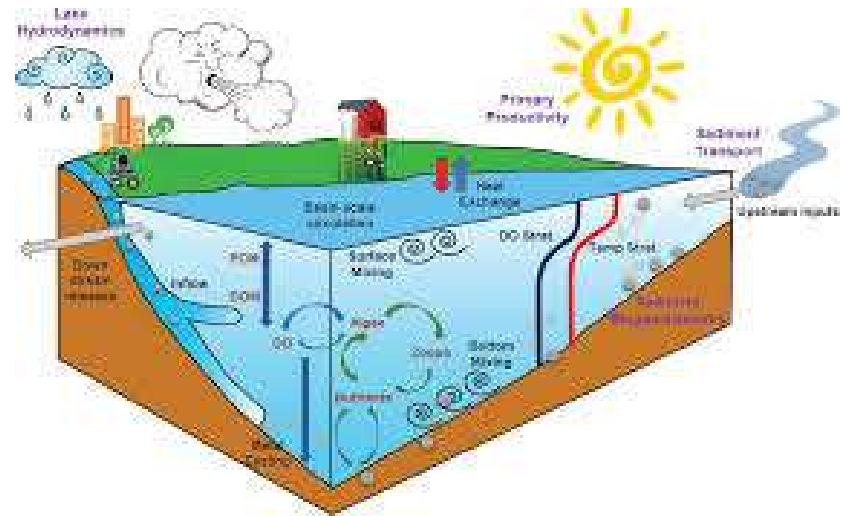
Si dice di qualsiasi sostanza che si presenti nello stato liquido o aeriforme. Qualsiasi sostanza allo stato fluido, in cui le molecole non hanno una posizione reciproca fissa.

Definizione di Meccanica dei fluidi:

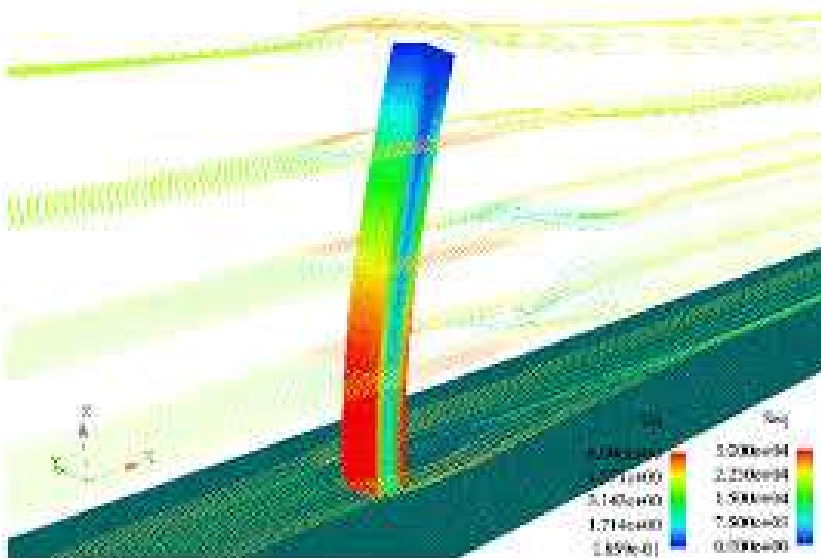
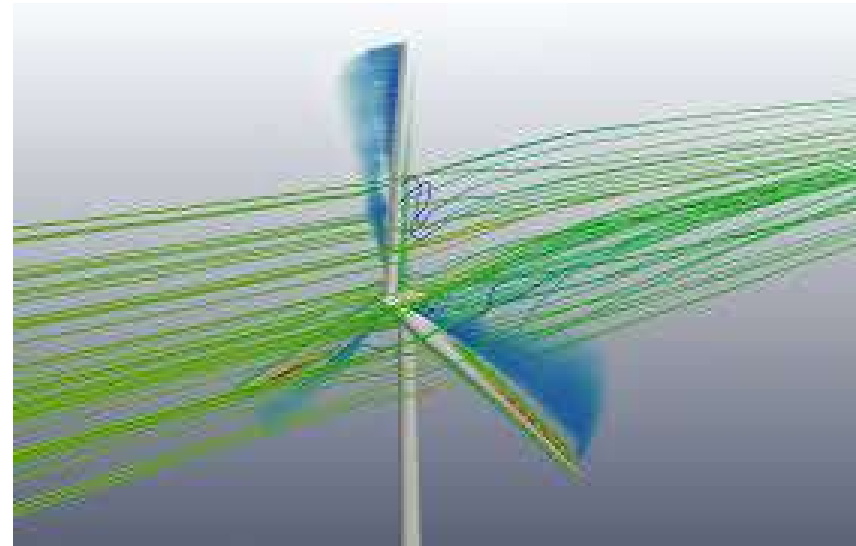
Branca della fisica che studia il movimento dei fluidi

**Dove entra la Meccanica
dei fluidi?**

Idrodinamica



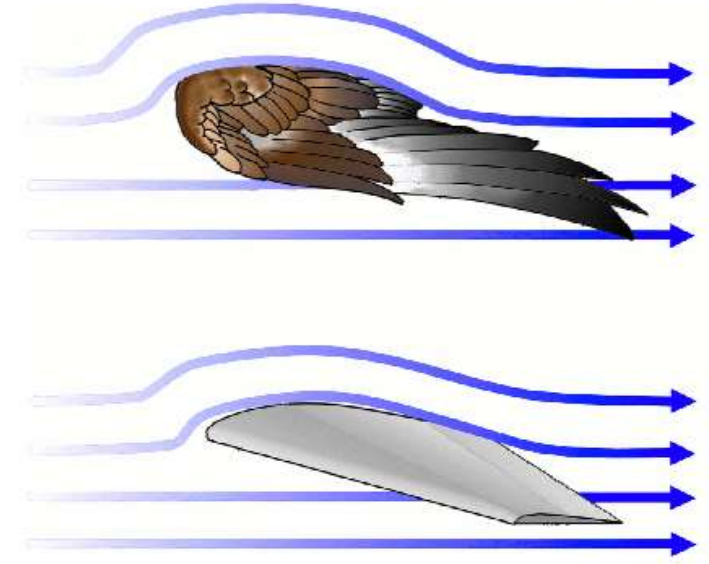
Interazione fluido/struttura



Aerodinamica



Si, ma come fa?



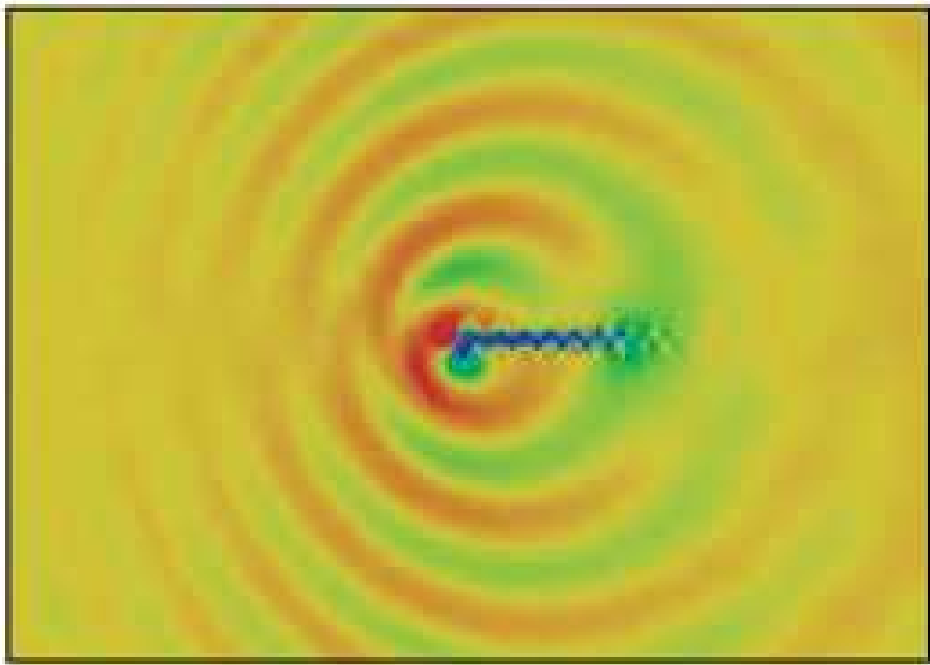
Meteorologia



Geologia

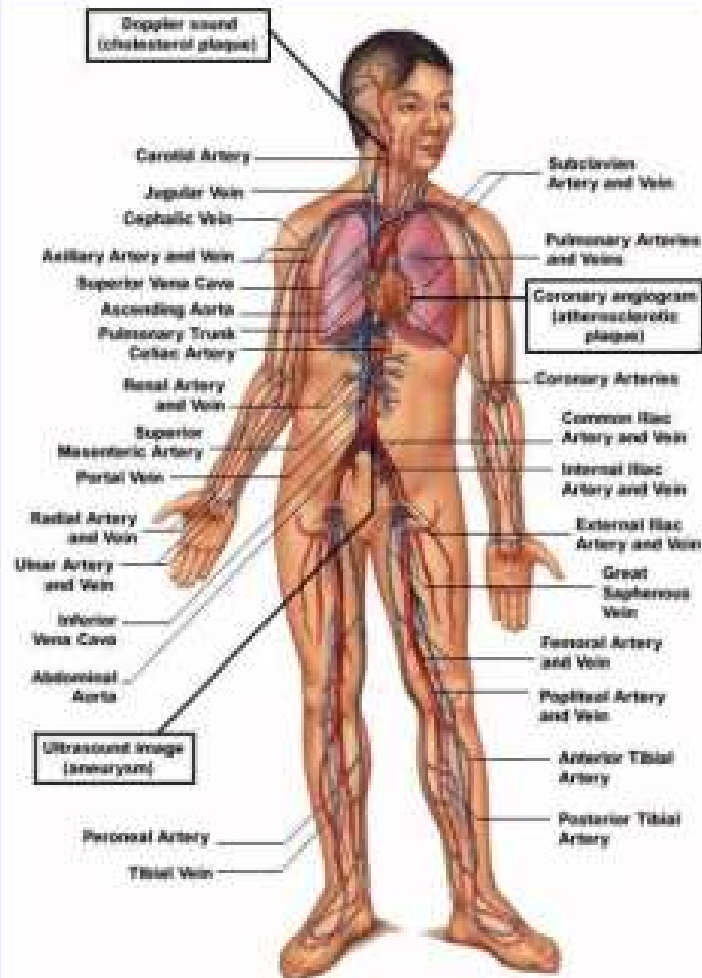


Fluido/acustica

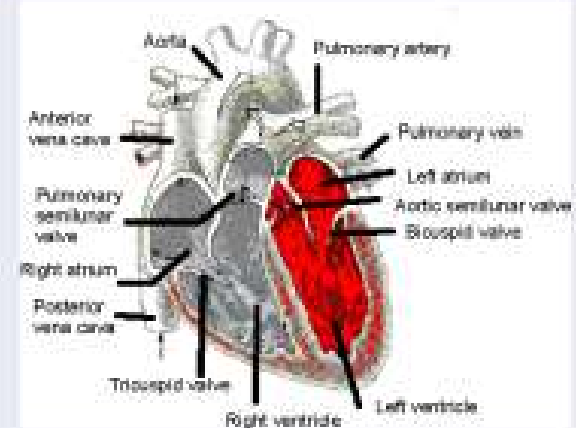


Bio-fluidodinamica

Fluidi umani



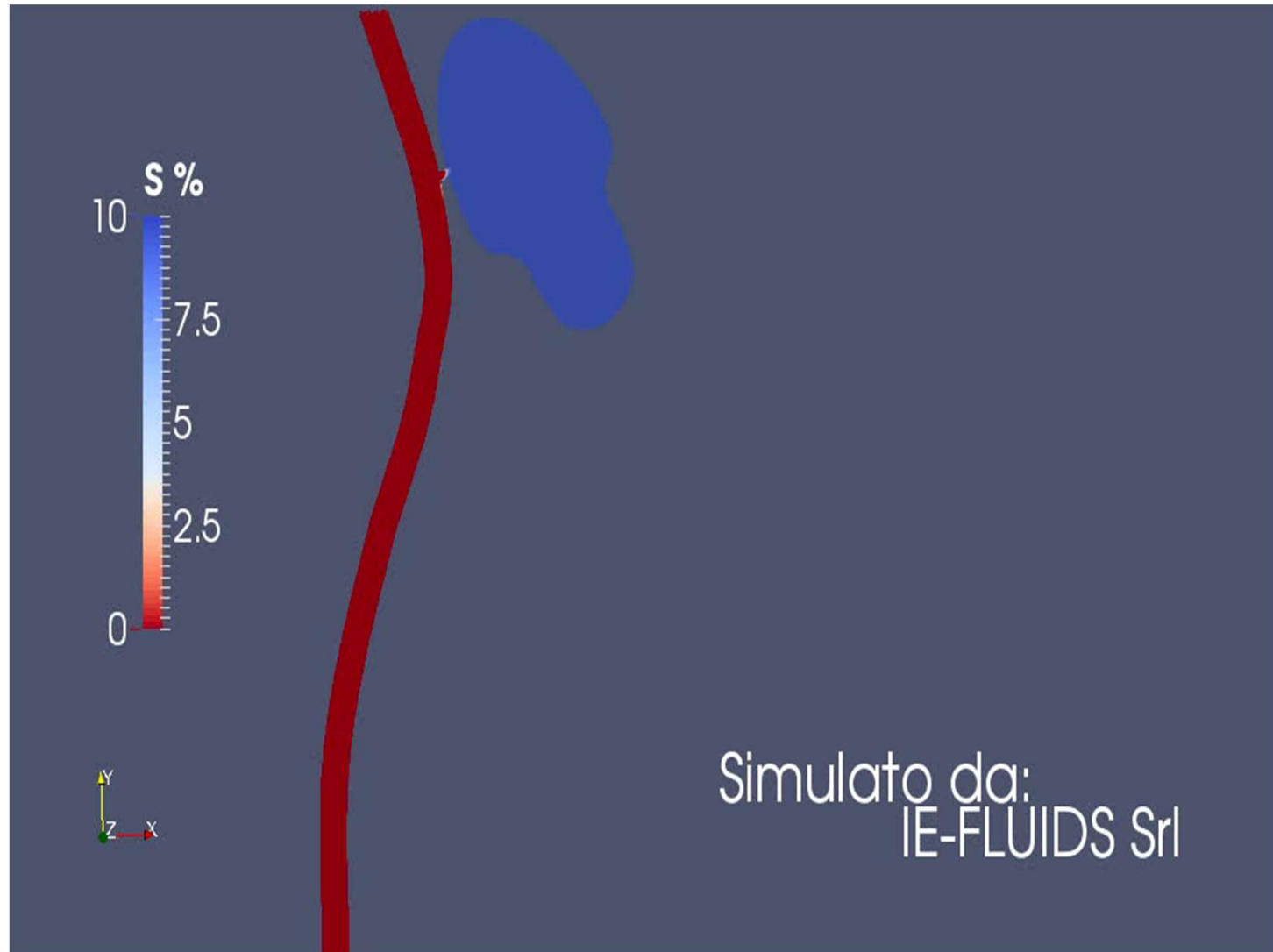
Emodinamica



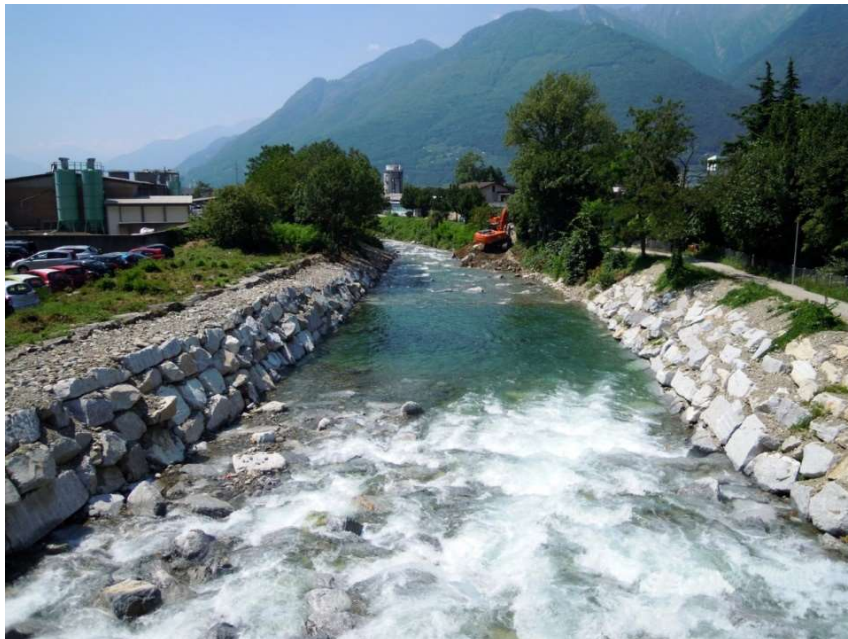
Polmoni/aerosol



Bio-fluidodinamica: Pseudoaneurisma in arteria femorale



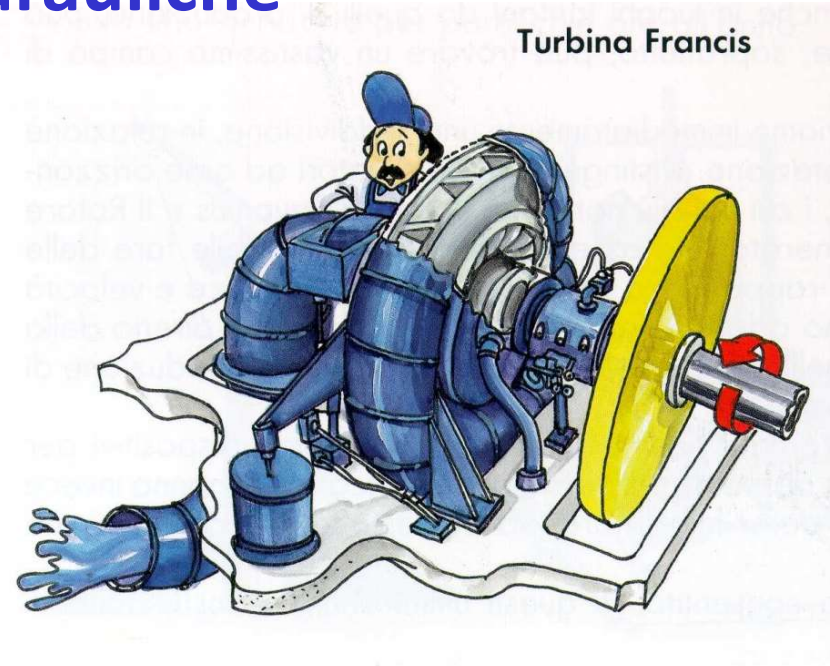
Idraulica fluviale



Idraulica marittima



Macchine Idrauliche



Fluidodinamica ambientale e per l'energia



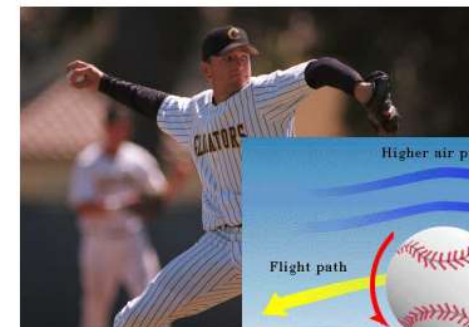
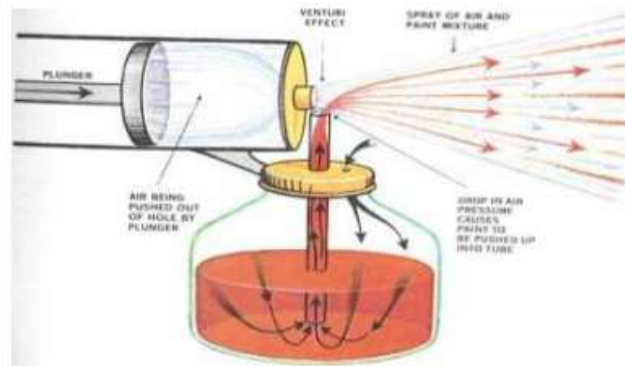
Altri esempi...



Palle ad effetto...



...svelato il trucco



**Il Modello fisico
matematico:
Le equazioni**

Conservazione della massa:

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

Conservazione della quantità di moto:

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

Conservazione dell'energia:

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

Equazioni di stato:

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

Conservazione della massa:

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

Conservazione della quantità di moto:

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

Conservazione dell'energia:

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

Equazioni di stato:

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

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:

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

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:

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

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 $\mathbb{R}^3 \setminus \mathbb{Z}^3$

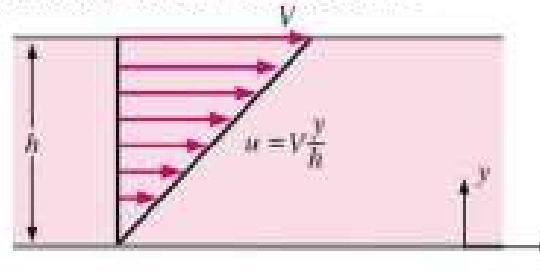
Approcci alternativi

- **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.

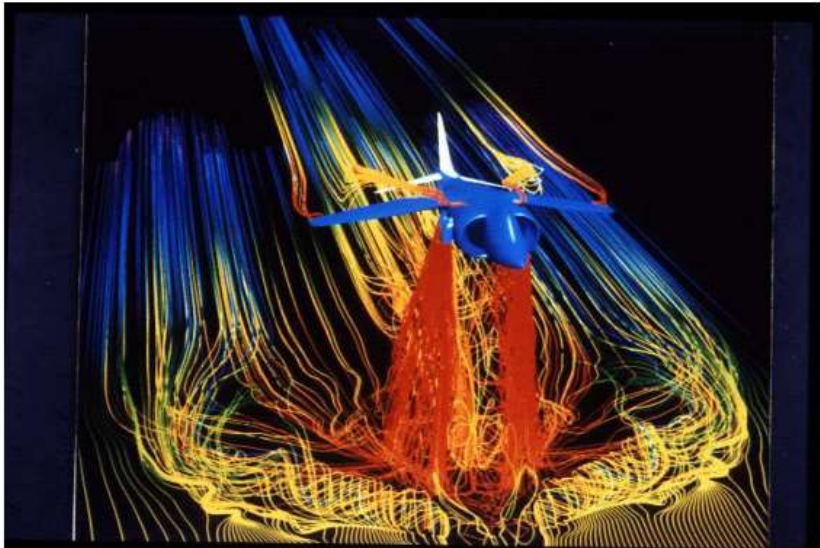


- Per **geometrie semplici** e **flussi laminari** le equazioni di NS si semplificano di molto (parecchi termini nulli, altri trascurabili) e permettono **soluzione in forma chiusa**.
- **Esempio**: flusso tra **due lastre infinite e parallele**, a distanza h , di cui una è ferma e l'altra trascinata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



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

Computational Fluid Dynamics (CFD): Sostituisce le equazioni alle derivate parziali con un sistema di equazioni algebriche



- Branca della fluidodinamica che utilizza **metodi numerici**, **potenza di calcolo** e **algoritmi efficienti** per risolvere ed analizzare **problemi pratici** di interesse ingegneristico.

La soluzione è approssimata e spesso influenzata da errori di approssimazione numerica. Comunque essa rappresenta lo standard di ausilio alla progettazione nell'industria e nell'ingegneria civile

Approcci alternativi

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

Experimental Fluid Mechanics: ricorre ad esperimenti di laboratorio per determinare il valore delle grandezze a scala reale:

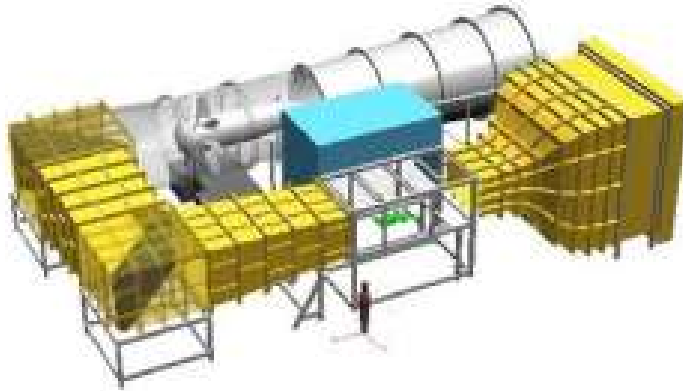
Problemi: costi e tempo richiesto



Esperimenti e facilities (1/2)

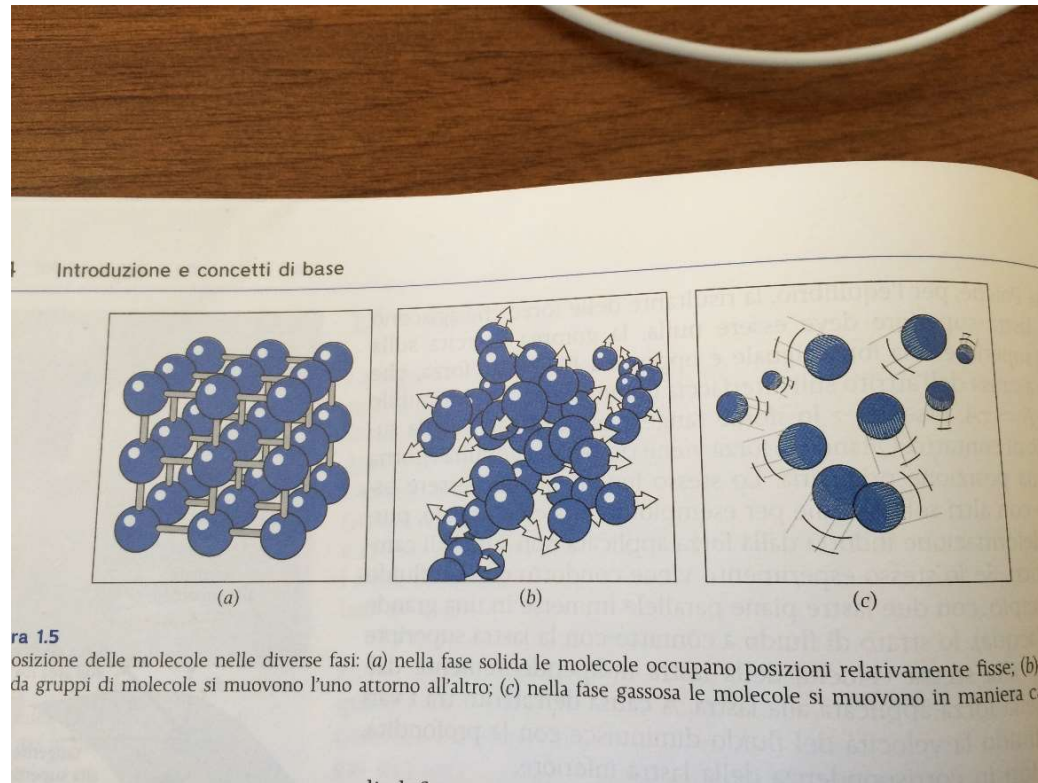


Esperimenti e facilities (2/2)



- 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).

Fluidi e Solidi



Nei fluidi il legame molecolare è debole:

- Liquidi (si adattano alla forma del contenitore mantenendo costante il volume occupato) → Praticamente incompressibili
- Gas (occupano tutto il volume disponibile e si disperdono in ambienti non confinati) → Compressibili

Il concetto di Continuo

Qualunque materiale in natura è composto da molecole e, da questo punto di vista, il comportamento del materiale dovrebbe essere studiato considerando le single molecole. Ciò comporterebbe l'applicazione delle leggi fisiche ad un numero elevatissimo ($O(10^{15})$ per mm^3) di particelle elementari!

Il materiale può essere però visto in maniera macroscopica, mediante un processo di zoom-out, identificandolo come un mezzo **Continuo**

Questo è possibile se la lunghezza macroscopica di interesse del problema è molto maggiore della distanza intermolecolare

In questo modo in ogni punto dello spazio si possono definire grandezze caratteristiche del problema e le loro derivate

lo studio del modello di corpo continuo di Cauchy si articola in tre fasi distinte:

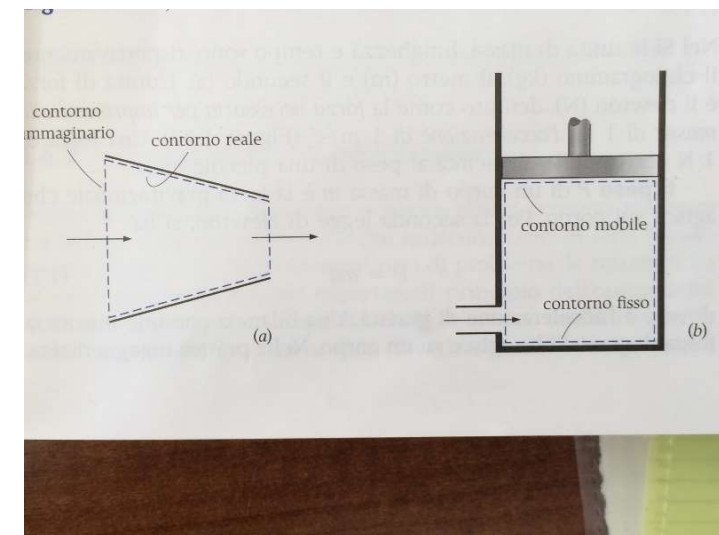
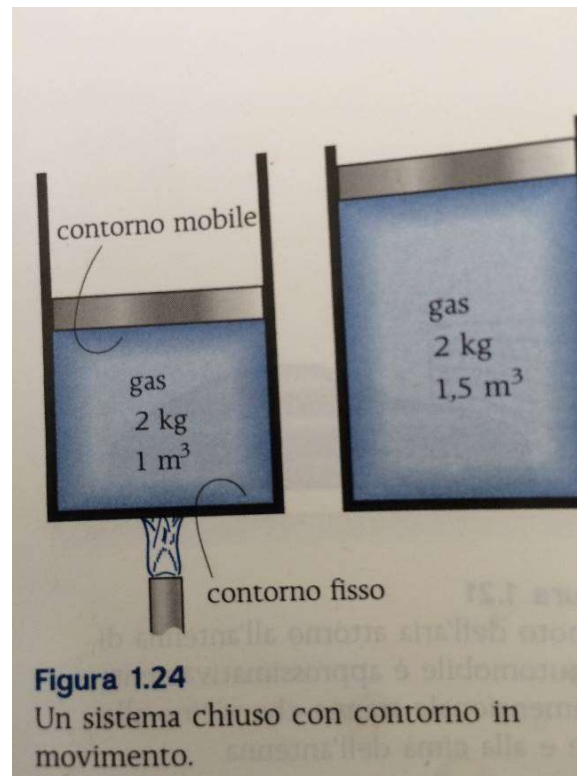
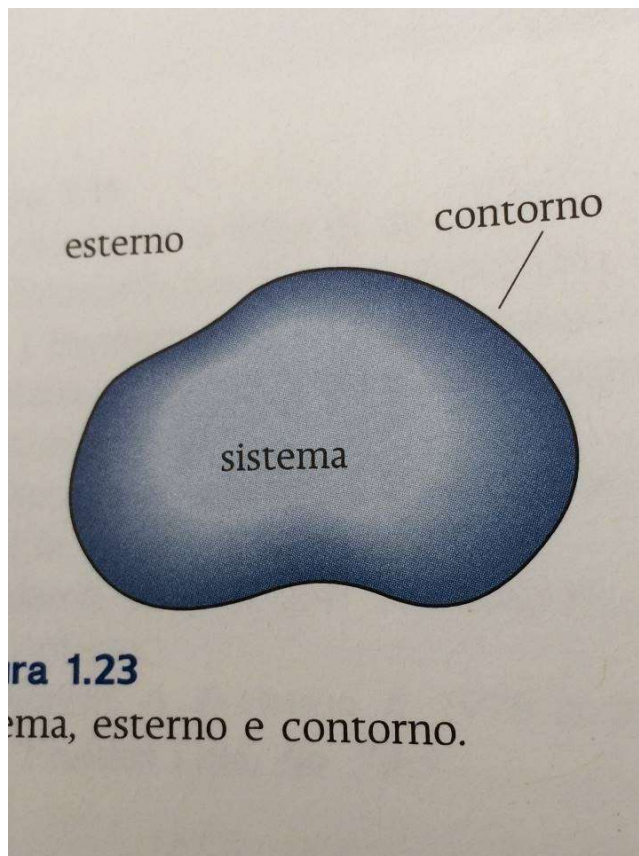
- la sua *caratterizzazione cinematica*, con la scrittura di precise relazioni di congruenza tra i diversi descrittori cinematici interni (della deformazione) ed esterni (gli spostamenti e i cambiamenti di configurazione).
- la scrittura delle *relazioni generali di bilancio*, che racchiudono le leggi fisiche cui il corpo deve sottostare durante il suo moto, a prescindere dal materiale di cui è costituito;
- lo studio delle *relazioni costitutive* che, caratterizzando il comportamento del particolare materiale costituente il corpo, differenziano una classe di corpi continui da un'altra.

In altre parole, gli effetti a scala molecolare necessitano di una robusta formulazione fisico-matematica per essere riprodotti alla scala del continuo

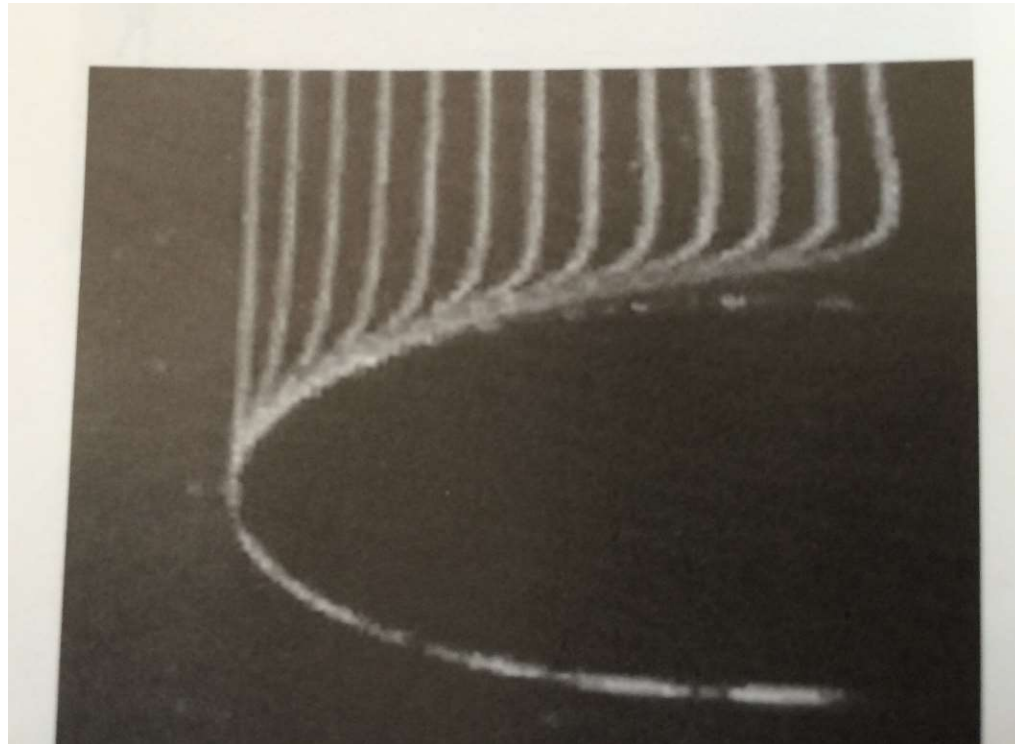
Il volume di controllo

Sistema: quantità di materia che occupa un volume nello spazio, oggetto dello studio:

- isolato: se non scambia massa quantità di moto ed energia con l'esterno
- chiuso: se può scambiare energia e lavoro con l'esterno
- aperto (volume di controllo): se può scambiare massa quantità di moto ed energia con l'esterno



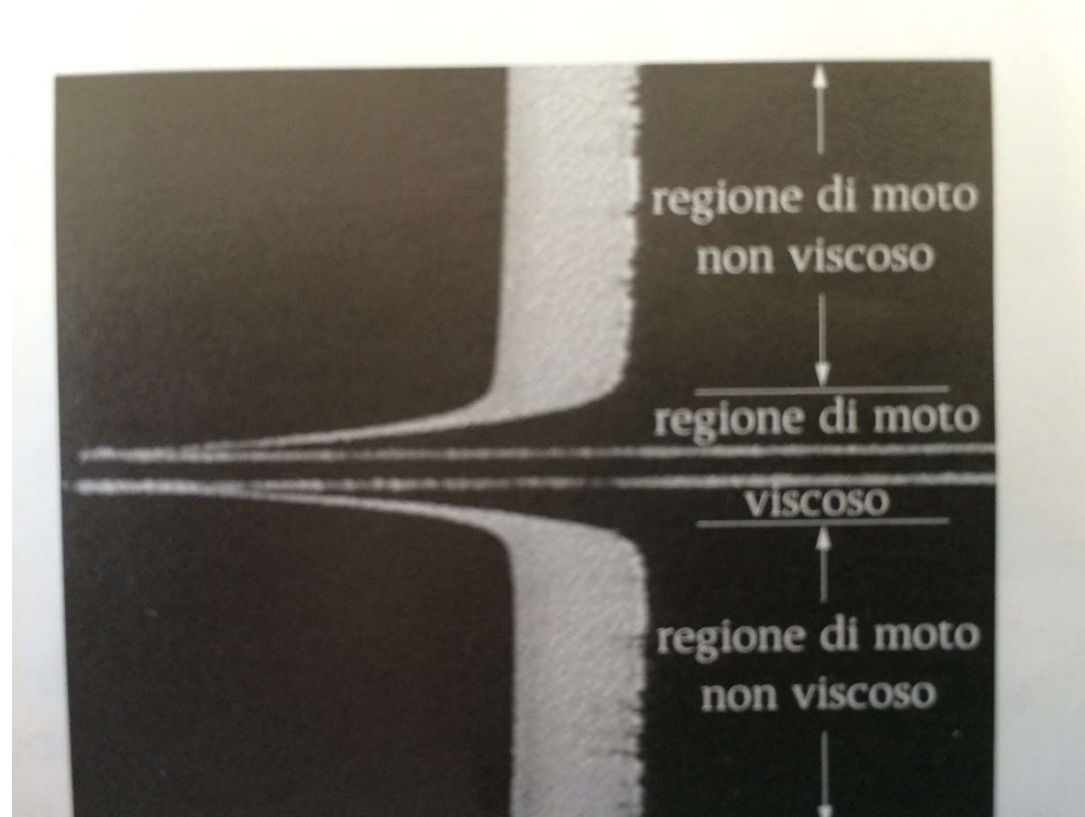
La condizione di aderenza



Quando un fluido viene a contatto con un corpo:

- Subisce una deviazione delle line di corrente a causa della presenza del corpo
→ Componente normale della velocità del fluido è pari a quella del corpo
- L'elemento di fluido aderente al corpo resta solidale al corpo stesso
→ Componente tangenziale della velocità del fluido è pari a quella del corpo

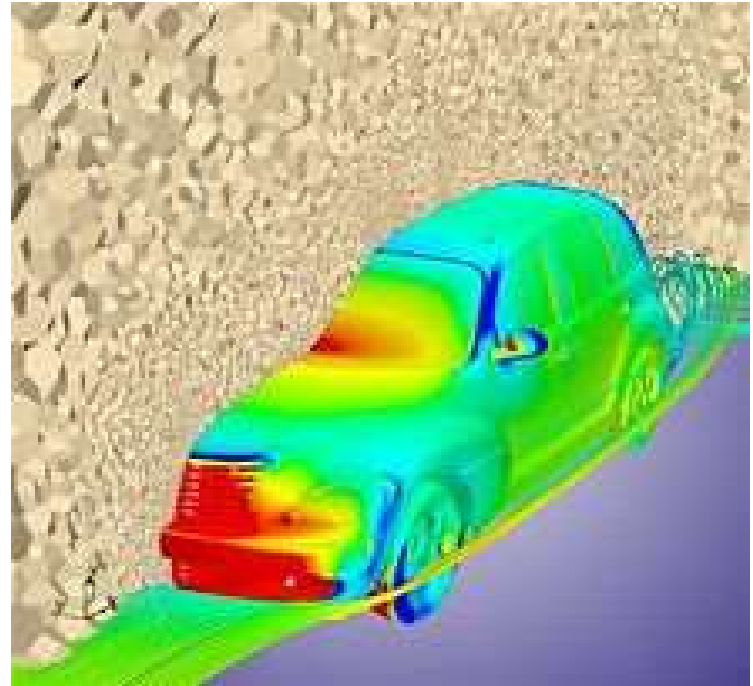
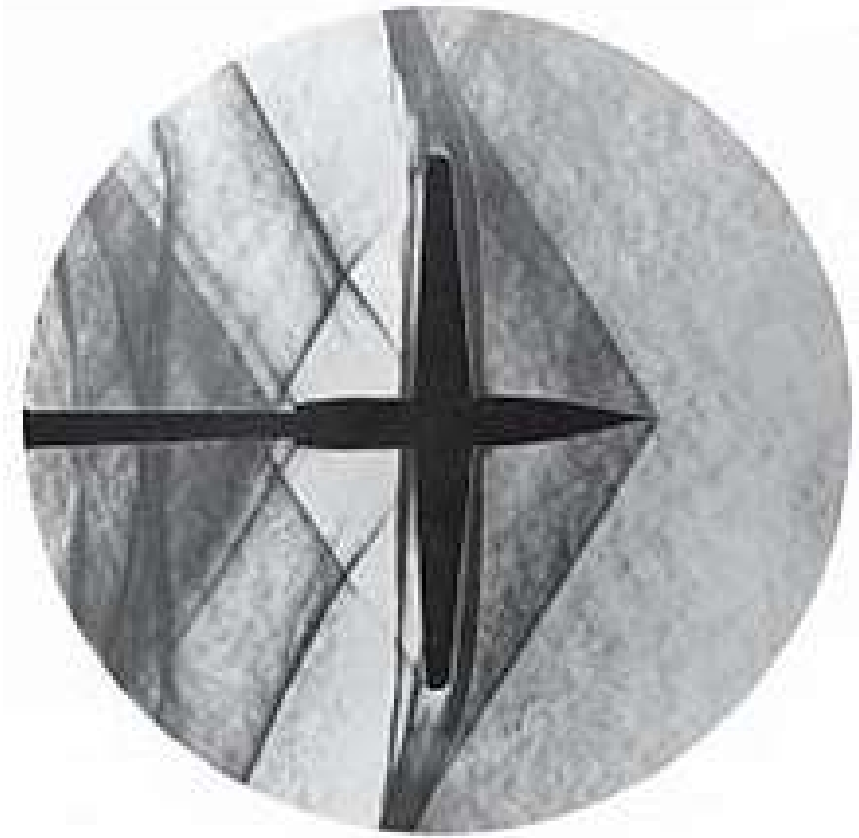
Moto viscoso e non viscoso



La viscosità è quella proprietà del fluido che rende interagenti strati di fluido in moto relativo tra loro

- Le zone di fluido lontane da pareti solide generalmente sono in un regime di moto non viscoso (dove la viscosità è poco importante)
- Le zone di fluido in corrispondenza alle pareti solide generalmente sono in un regime di moto viscoso (dove la viscosità è importante)

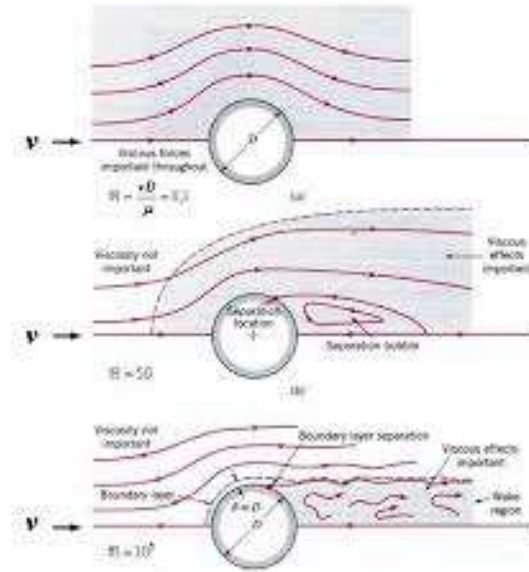
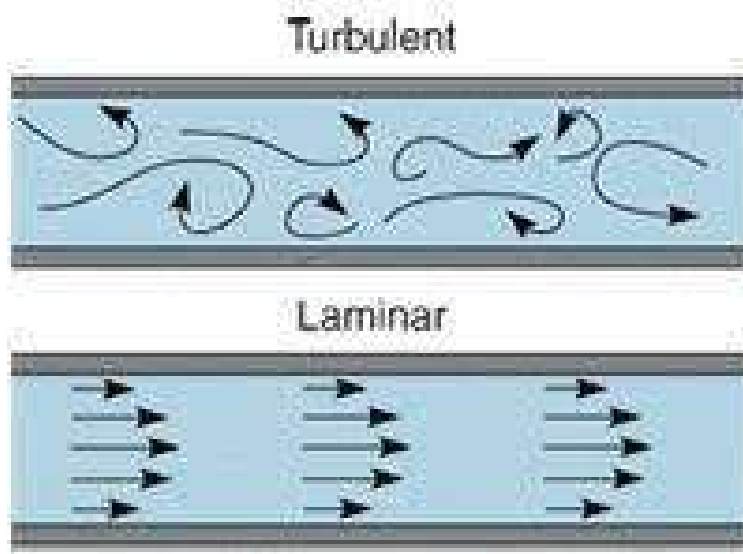
Moto comprimibile e incompressibile



Comprimibile quando la densità varia notevolmente con la pressione
(aria: variazione di pressione di 0.01 bar induce una variazione di densità dell'1%)

Incomprimibile quando la densità è praticamente costante con variazioni di pressione notevoli
(acqua: variazione di pressione di 120 bar induce una variazione di densità dell'1%)

Moto laminare e turbolento



Laminare: moto regolare ed ordinato degli elementi di fluido; il trasferimento di quantità di moto tra elementi adiacenti è regolato dalla viscosità

Turbolento: moto caotico, sempre tridimensionale e non stazionario; il trasferimento di quantità di moto tra zone distinte di fluido avviene per effetti inerziali

Molti dei processi studiati nell'ingegneria sono in regime turbolento

Moto a gravità o forzato

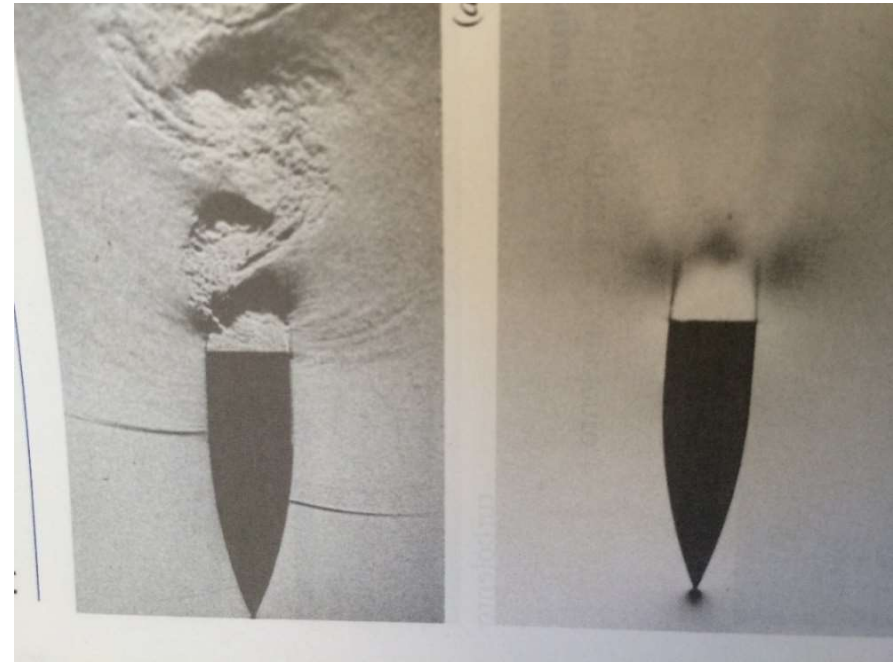


A gravità: quando la forzante è la forza di gravità agente sul fluido:

- può agire come nei problemi di idraulica fluviale inducendo il moto della corrente su un piano inclinato;
- può agire causando forze di galleggiamento legate a differenze di densità nel fluido;

Forzato: la forzante è esterna, fornita da una macchina (pompa idraulica, turbine a gas etc., elica...) che genera un salto di pressione tra monte e valle del flusso

Moto permanente o vario (rispetto al tempo)



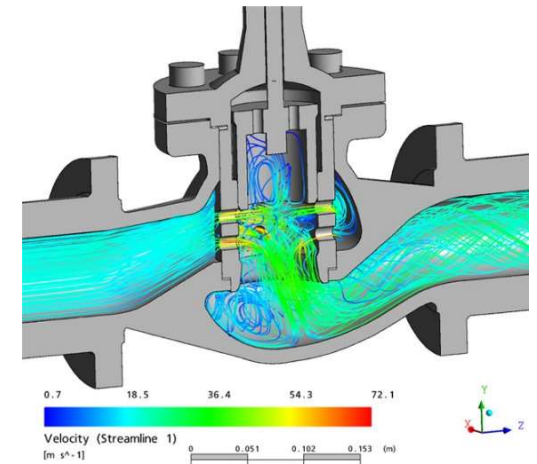
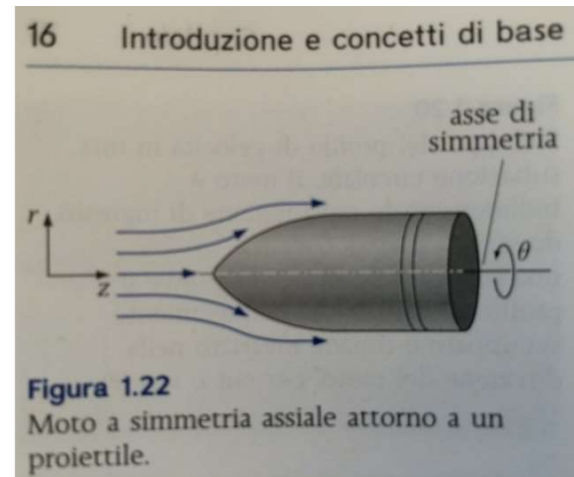
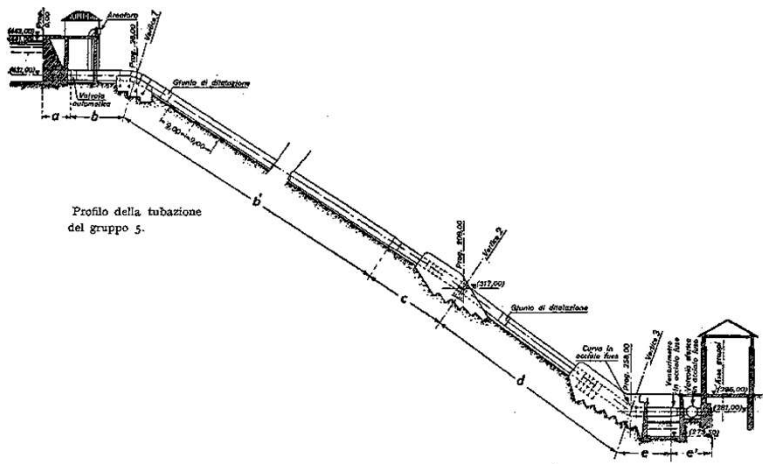
Permanente o stazionario: se in ogni punto del campo di moto le grandezze caratteristiche sono costanti nel tempo

Vario o non stazionario: se le grandezze caratteristiche variano nel tempo.

Casi particolari:

- periodico: un moto vario con grandezze caratteristiche che oscillano intorno ad un valore medio. Il moto si ripete identicamente dopo ogni period T
- transitorio: è una condizione di moto vario dove le grandezze caratteristiche muovono da una condizione di moto permanente ad un'altra (per esempio avvio o arresto del moto in una condotta etc.)

Moto uni-bi-tridimensionale(rispetto allo spazio)



Unidirezionale: se le grandezze caratteristiche
Possono essere considerate variabili lungo una sola direzione (es. condotte lunghe)

Bidimensionale: le grandezze caratteristiche possono essere considerate variabili su un piano (esempio, moti assial-simmetrici)

Tridimensionale: le grandezze caratteristiche possono essere considerate variabili nello spazio (es. Moto all'interno di una valvola, intorno ad un aereo o ad un'automobile)

Le scale del moto:

Implicitamente abbiamo introdotto un concetto fondamentale

I principi della fluidodinamica sono invarianti:

Conservazione della massa, della quantità di moto e dell'energia

A seconda delle scale spaziali e temporali del moto alcuni effetti sono dominanti su altri

	Environmental Fluid Mechanics	Fluid Mechanics	Geophysical Fluid Dynamics	Hydraulics	Hydrology
Air example	Sea breeze	Airfoil	Storm	—	—
Water example	Danube River	Pump	Gulf Stream	Dam	Watershed
Turbulence	Beneficial (Dilution)	Detrimental (Drag)	Secondary importance	Secondary importance	Unimportant
Human control	Limited	Dominant	Nil	Dominant	Limited
Purpose	Prediction & Decision	Design & Operation	Prediction & Warnings	Design & Operation	Prediction & Decision