ELEMENTI DI MECCANICA

4 Fluidi

Giovanni Buccolieri

Università del Salento, Dipartimento Matematica e Fisica

e-mail: giovanni.buccolieri@unisalento.it

Meccanica dei Fluidi

Fluidi. Viscosità. Pressione

Fluidostatica. Legge di Stevino, Pascal, Archimede.

Fluidodinamica. Moto stazionario. Tubo di flusso. Portata.

Legge di Bernoulli.

Fluidi

I fluidi comprendono i liquidi e i gas.

I fluidi possono fluire o scorrere, e quindi, a differenza dei solidi, non riescono a sostenere staticamente uno sforzo di taglio.

I liquidi, a differenza dei gas, sono essenzialmente incomprimibili, quindi la loro densità si può considerare (approssimativamente) costante.

La meccanica dei fluidi si divide in:

- Statica;
- Dinamica.

Lo studio concerne non solo i fluidi, ma anche i corpi immersi in essi o le pareti che li contengono.

Fluidi

Riguarderemo i fluidi come sistemi continui, caratterizzati da densità ρ e composti di elementi di massa ***dm*** e volume ***dV***:

$$\mathbf{dm = \rho dV}$$

In realtà la materia di cui sono fatti i fluidi ha struttura discreta, cioè è costituita di atomi e molecole.

Considerarli sistemi continui è un'utile approssimazione.

I fluidi possono trasmettere sforzi:

- Nei liquidi grazie alle forze intermolecolari a corto raggio d'azione.
- Nei gas grazie alle collisioni tra le molecole che li costituiscono.

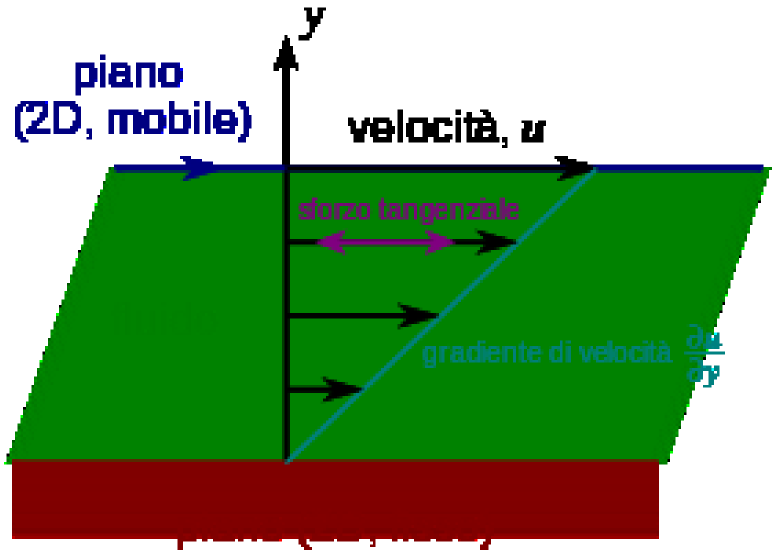
Viscosità

In un fluido in moto lo sforzo può trasmettersi anche perpendicolarmente alla direzione lungo cui è applicata la sollecitazione.

Questo è possibile grazie ad una grandezza fisica propria dei fluidi detta **viscosità** (e indicata con η).

Quando c'è scorrimento relativo tra due elementi di fluido, compaiono sull'area di contatto forze tangenziali d'attrito interno.

I due elementi esercitano l'uno sull'altro due forze uguali e contrarie (3° principio).



Viscosità

In un fluido in equilibrio statico non ci sono forze viscose, quindi le condizioni di equilibrio sono le stesse per fluidi viscosi e non viscosi.

Non esiste il corrispondente dell’attrito statico: in assenza di moto (v=0) non c’è attrito viscoso.

Per semplicità si considera spesso il caso ideale in cui la viscosità sia nulla e la densità sia uniforme (fluido ideale).

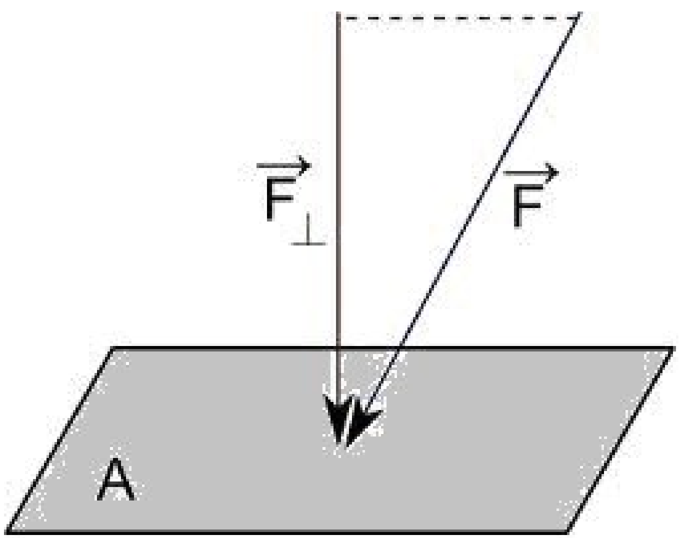
Pressione

In un intorno di un punto P qualunque di una superficie a contatto con un fluido, consideriamo una superficie di area ***A*,** su di essa il fluido agisce con una forza ***F***. Si considera la componente perpendicolare alla superficie.

Definiamo la pressione **p** come forza per unità di superficie:

$$\mathbf{p = \frac{F_\perp}{A}}$$

$$[\mathbf{p}] = \frac{\mathbf{N}}{\mathbf{m^2}} = \mathbf{Pa}$$



Pressione

Teorema: la forza esercitata da un fluido in equilibrio statico su una superficie è perpendicolare alla stessa, punto per punto.

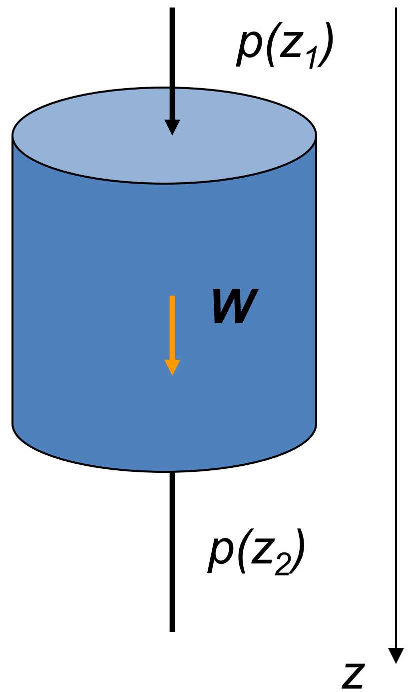
Dimostrazione: se esistesse una componente parallela, il fluido scorrerebbe e non sarebbe in condizioni statiche.

Legge di Stevino

Teorema: in un fluido di densità costante, in equilibrio statico nel campo gravitazionale, la pressione aumenta linearmente con la profondità.

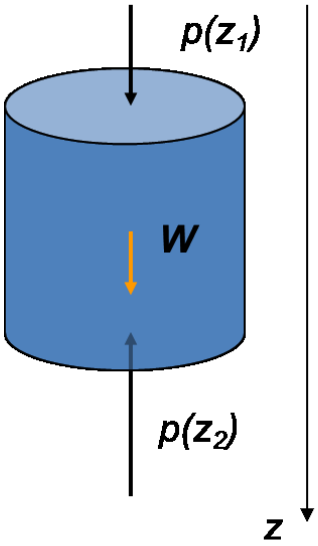
Dimostrazione: sia dato un elemento cilindrico di fluido di volume $\boldsymbol{V}$, base $\boldsymbol{A}$ e altezza z_2-z_1.

L'equilibrio statico impone che la forza risultante sia nulla.



Legge di Stevino

Lungo *z* le forze di pressione e la forza peso devono bilanciarsi. Detta ρ la densità del fluido, si ha:



$$\mathbf{p(z_1)\cdot A + W = p(z_2)\cdot A}$$

$$\mathbf{p(z_2) = p(z_1) + \frac{W}{A} = p(z_1) + \rho\frac{V}{A}g = p(z_1) + \rho(z_2 - z_1)g}$$

$$\boxed{\mathbf{p(z_2) = p(z_1) + \rho g(z_2 - z_1)}}$$

Se le quote differiscono per un infinitesimo **dz**:

$$\mathbf{p(z+dz) - p(z) \equiv dp = \rho g dz}$$

Abbiamo cioè la versione differenziale della legge: $$\mathbf{\frac{dp}{dz} = \rho g}$$

Legge di Pascal

Orientiamo z verso il basso e poniamo come origine (z=0) la superficie limite del liquido, sia p_0 la pressione esterna agente su tale superficie, abbiamo:

$$\mathbf{p(z) = p_0 + \rho g z}$$

Ogni variazione della pressione esterna comporta un uguale cambiamento della pressione in ciascun punto del fluido:

$$\mathbf{\Delta p(z) = \Delta p_0}$$

Pressa idraulica

La pressa idraulica è un'applicazione della legge di Pascal.

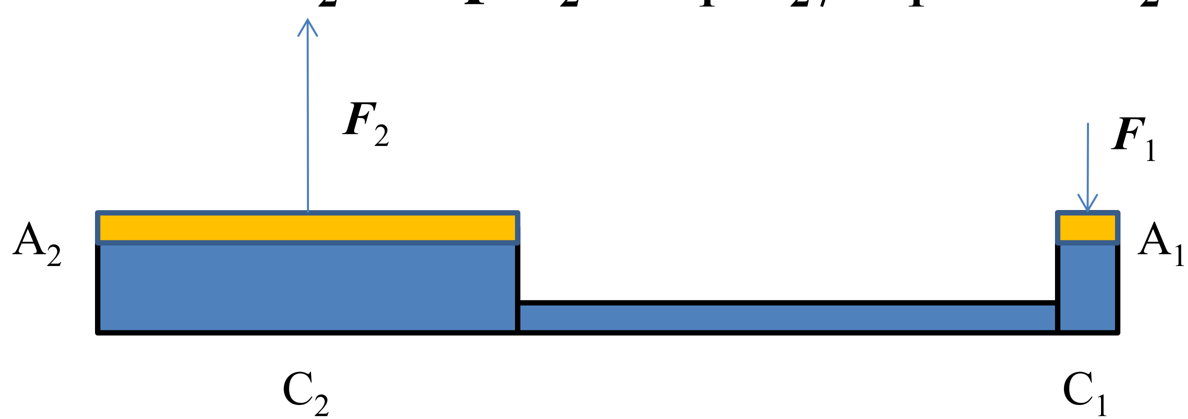
E` formata da due contenitori idraulici a tenuta C_1 e C_2 , collegati da un condotto e dotati di due pistoni scorrevoli di area A_1 e A_2.

Applicando una forza $\boldsymbol{F}_1$ sul pistone 1, la pressione in ogni punto del fluido aumenta di:

$$\Delta p = F_1 / A_1$$

Sul pistone 2 questo aumento di pressione si traduce in una forza:

$$F_2 = \Delta p A_2 = F_1 A_2 / A_1 \quad \rightarrow \quad F_2 > F_1$$

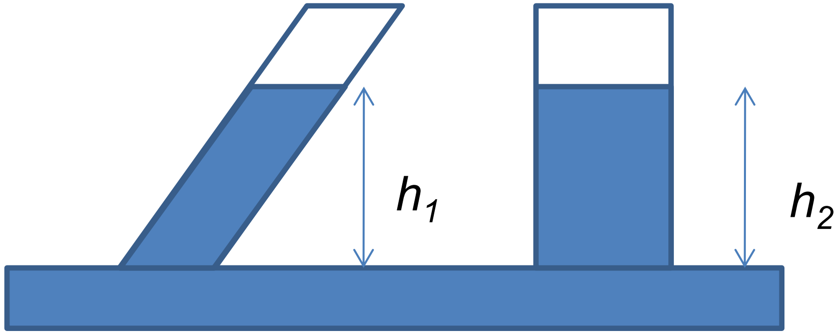


Vasi comunicanti

L'altezza raggiunta da un liquido in vasi comunicanti è uguale in tutti i vasi:

$$h_1 = h_2$$

Il principio si dimostra con la legge di Stevino: la pressione sulla superficie libera è uguale per i diversi vasi, così come quella alla base. Ne segue che la differenza di pressione è uguale per i diversi vasi, il che si traduce in un'uguale altezza delle colonne di fluido.

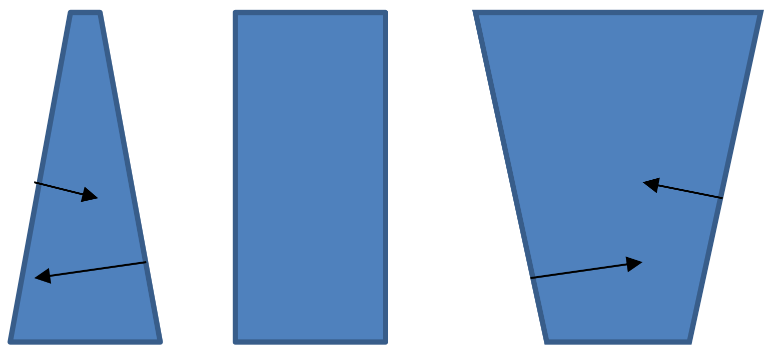


$$\Delta p_1 = \rho g h_1 = \Delta p_2 = \rho g h_2$$

Paradosso idrostatico

La pressione dipende solo dall'altezza del fluido sovrastante e non dalla sua massa e quindi nei tre contenitori in figura, la pressione sul fondo è la stessa, nonostante la massa del fluido sia diversa nei tre casi.

Ciò è dovuto al fatto che le pareti contribuiscono con una forza che si compone col peso del fluido.



Pressione <u>all'interno</u> del contenitore

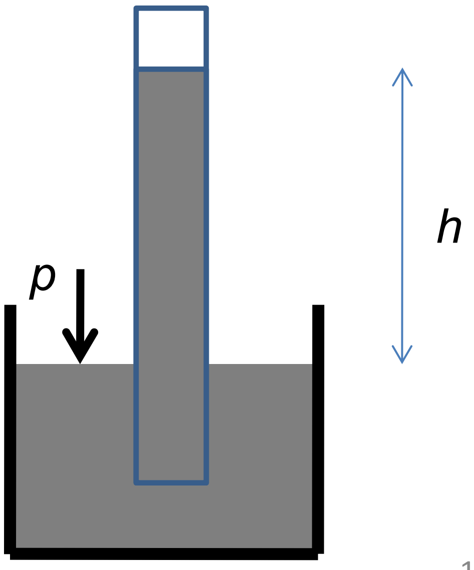
Barometro di Torricelli

E` costituito da un tubo di vetro aperto ad un'estremità e riempito di mercurio e da una vaschetta contenente mercurio in cui capovolgere il tubo.

Esso servì a dimostrare per la prima volta che l'atmosfera ha un peso ed è usato ancor oggi per misurare la pressione atmosferica (barometro di Fortin).

La pressione esercitata dalla colonna di mercurio di altezza *h* è bilanciata dalla pressione atmosferica agente sulla superficie libera del mercurio nella vaschetta.

$$\rho g h = p$$

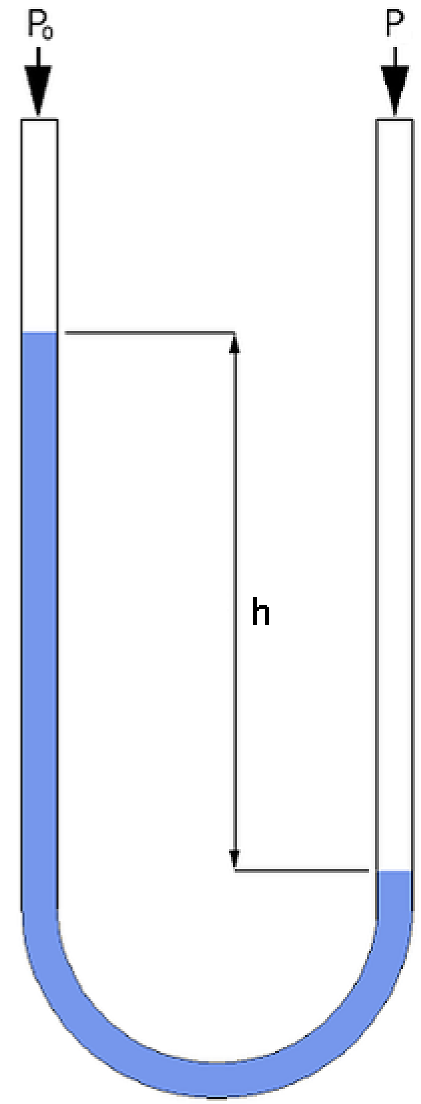


Manometro a liquido

E` costituito da un tubo a ”U” riempito da un liquido di densità nota ρ.

Serve per misurare una differenza di pressione (o pressione differenziale).

$$p - p_0 = \rho g h$$



Superfici isobariche

Dalla legge di Stevino: $$\mathbf{p(z) = p_0 - \rho g z}$$

Vediamo che per *z=costante* la pressione è costante.

Ma *z=costante* rappresenta un piano orizzontale

Superfici di questo tipo per cui la pressione è costante si dicono <u>isobare</u>.

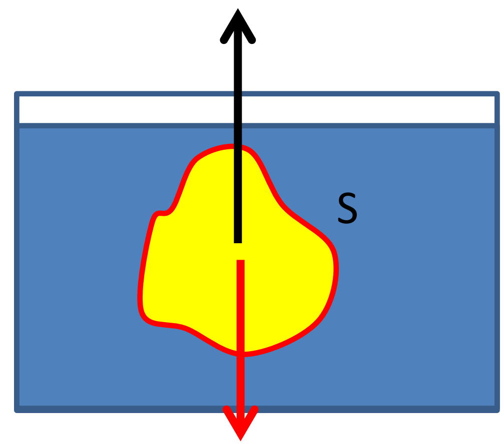
Forza di Archimede

Sia dato un corpo di peso $\boldsymbol{W}$ e densità $\boldsymbol{\rho}$ immerso in un fluido di densità $\boldsymbol{\rho_f}$. Esiste una forza, detta di Archimede ($\mathbf{F_A}$), che agisce sul corpo, uguale al peso del volume di fluido occupato dal corpo e diretta in direzione opposta al suo peso.

La forza risultante risulta:

$$\mathbf{F_A = \rho_f V g}$$

$$\mathbf{W - F_A = Mg - M_f g = V(\rho - \rho_f)g}$$



$$\mathbf{W = mg = \rho V g}$$

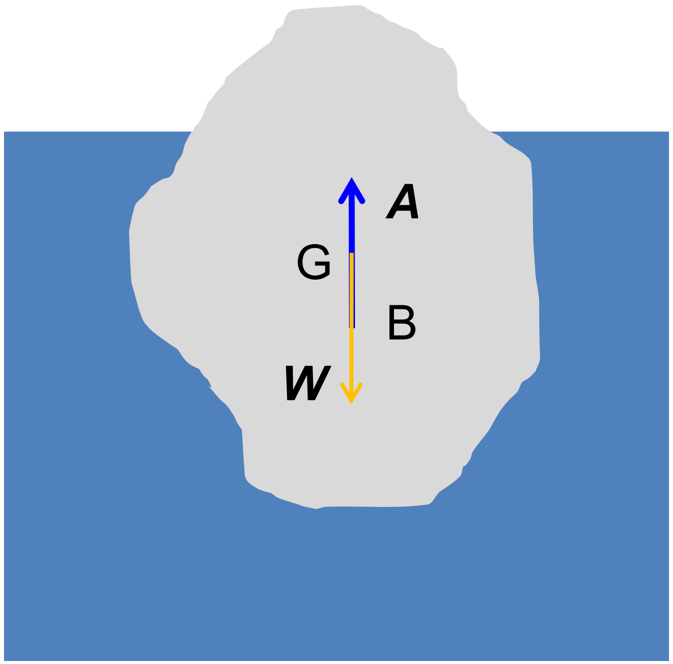
Se $\rho=\rho_f$ il corpo è in equilibrio;

Se $\rho<\rho_f$ il corpo galleggia;

Se $\rho>\rho_f$ il corpo affonda.

Galleggiamento

Iceberg (densità ρ_g) in equilibrio statico, quindi: $\mathbf{W = F_A}$



Ovvero:

$$\rho_{H2O} V_{imm} g = \rho_{ghiaccio} V_{tot} g$$

Da cui troviamo il volume immerso:

$$\frac{V_{imm}}{V_{tot}} = \frac{\rho_{ghiaccio}}{\rho_{H_2O}} = \frac{920}{1000} \cong 90\%$$

Misura di densità di un liquido: Densimetro

Sia $\boldsymbol{m}$ la massa del densimetro, $\boldsymbol{A}$ sia la sezione dello stelo su cui è incisa una scala che permette di leggere la lunghezza immersa $\boldsymbol{h}$ dello stelo.

Sia $\boldsymbol{V_0}$ il volume del bulbo.

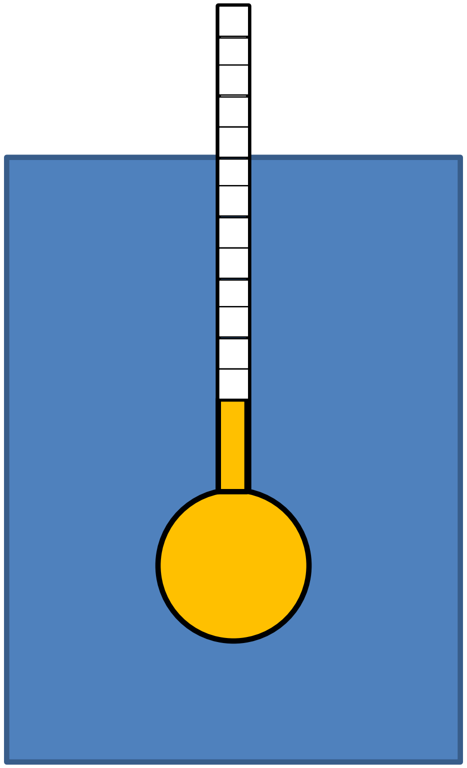
All'equilibrio:

$$\mathbf{W = F_A}$$

Da cui la densità del liquido è data da:

$$\mathbf{mg = \rho V_{im} g = \rho (V_0 + Ah) g}$$

$$\boldsymbol{\rho} = \frac{\mathbf{m}}{\mathbf{V_0 + Ah}}$$



Misura di densità di un corpo sommerso

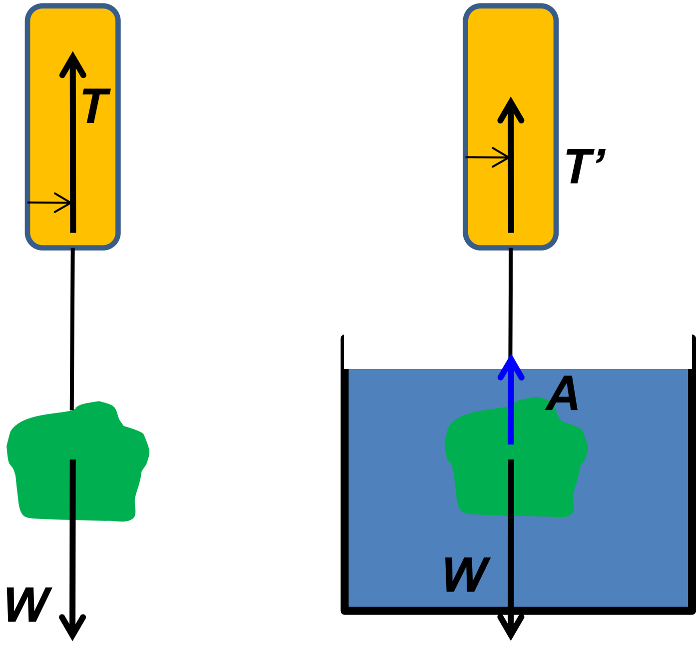
Mediante un dinamometro si eseguono due misure, la prima con il corpo in aria e la seconda con il corpo immerso in un liquido di densità nota ρ_L:

$$\mathbf{T} = \mathbf{W} = \rho_c \mathbf{V} \mathbf{g}$$

$$\mathbf{T}' = \mathbf{W} - \mathbf{F}_A = \mathbf{T} - \rho_L \mathbf{V} \mathbf{g}$$

$$\mathbf{V} = \frac{\mathbf{T} - \mathbf{T}'}{\rho_L \mathbf{g}}$$

$$\rho_c = \frac{\mathbf{T}}{\mathbf{V}\mathbf{g}} = \frac{\mathbf{T}}{\mathbf{T} - \mathbf{T}'} \rho_L$$



Moto di un fluido

La descrizione del moto di un fluido è, in generale, molto complessa.

Adotteremo la descrizione <u>euleriana</u> del moto: fissiamo l'attenzione su di un punto P(x,y,z) dello spazio e sulla velocità $\boldsymbol{v}(x,y,z,t)$ di un elemento fluido che passa per tale punto.

Scopo della dinamica dei fluidi è determinare la funzione $\boldsymbol{v}$, in base ai principi della meccanica, per tutti i punti in cui si trova il fluido, e per tutti i valori di $\boldsymbol{t}$.

Moto stazionario

Per semplicità studieremo solo fluidi ideali e il moto in regime stazionario, caratterizzato dal fatto che $\boldsymbol{v}$ dipenda solo dalle coordinate spaziali, ma sia **costante nel tempo**: $\boldsymbol{v}=\boldsymbol{v}(x,y,z)$.

Linee di corrente o di flusso: sono linee (traiettorie) percorse da ciascun elemento ideale di volume.

In ogni punto hanno la direzione e il verso della velocità $\boldsymbol{v}$, ne segue che due linee di flusso non possono intersecarsi.

Sperimentalmente si possono visualizzare, almeno approssimativamente, iniettando nel fluido polveri particolari che vengano trasportate dalla corrente del fluido.

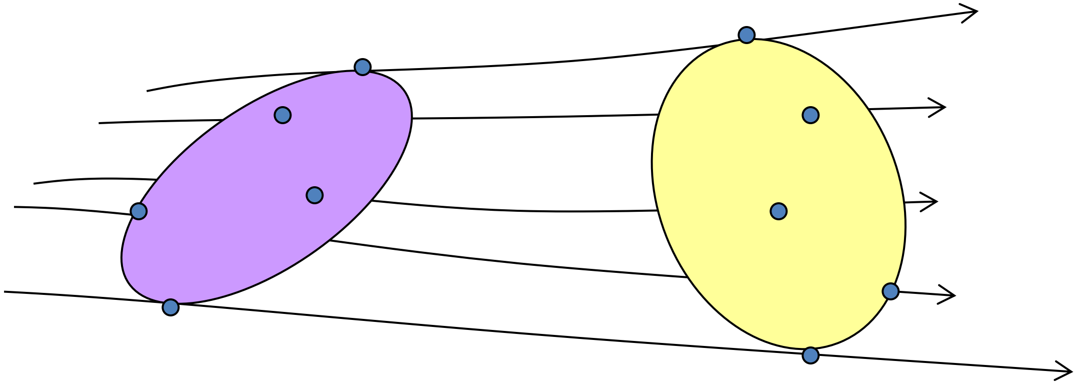
Tubo di flusso

Tutte le linee di corrente che passano attraverso una generica superficie attraversata dal fluido, individuano un <u>tubo di flusso</u>.

Un condotto chiuso, se riempito <u>completamente</u> di fluido, è un esempio di tubo di flusso, in cui la superficie in questione è una generica sezione del condotto.

Per un tubo finito, possiamo definire una superficie laterale e due superfici di base.

In situazione stazionaria le linee di flusso non possono intersecare la superficie laterale.

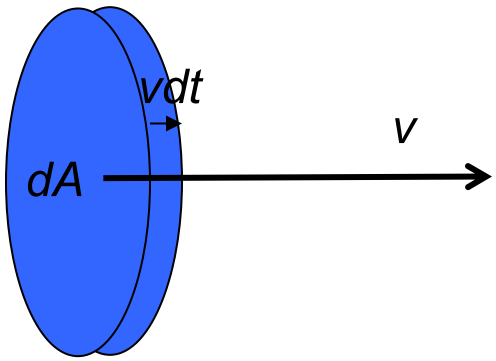


Portata

Consideriamo un tubo di flusso di area ***dA*** perpendicolare alle linee di corrente.

Il volume ***dV*** di fluido che attraversa ***dA*** nel tempo ***dt*** è pari al volume del solido di base ***dA*** e altezza ***vdt***.

$$\mathbf{dV = dA\ v\ dt}$$



Portata

Il volume di fluido passato nell'unità di tempo prende il nome di portata (volumetrica):

$$\mathbf{dq = \frac{dV}{dt} = v\,dA}$$

Se la sezione è finita, la portata relativa è data dall'integrale esteso a tutta la sezione:

$$\mathbf{q = \frac{dV}{dt} = \int_S v dA}$$

La portata ha dimensioni: $\mathbf{[q] = L^3 T^{-1}}$

E l'unità di misura è il m^3/s.

Portata e flusso

La portata o portata volumica, è definita come il rapporto tra il volume di fluido **dV** che attraversa una data sezione nell'intervallo di tempo **dt** e il **dt** stesso:

$$q = \frac{dV}{dt} = vA$$

Supposta la velocità uniforme sulla superficie

Se **dm** indica la massa di fluido che attraversa la sezione nel tempo **dt**, il flusso di massa (o portata in massa) è definito come:

$$\Phi = \frac{dm}{dt} = \rho_m \frac{dV}{dt} = \rho_m vA$$

$$q = vA$$

Portata volumica

$$\Phi = \rho_m vA$$

Portata in massa

$$[q] = \frac{m^3}{s}, \quad [\Phi] = \frac{kg}{s}$$

Equazione di continuità

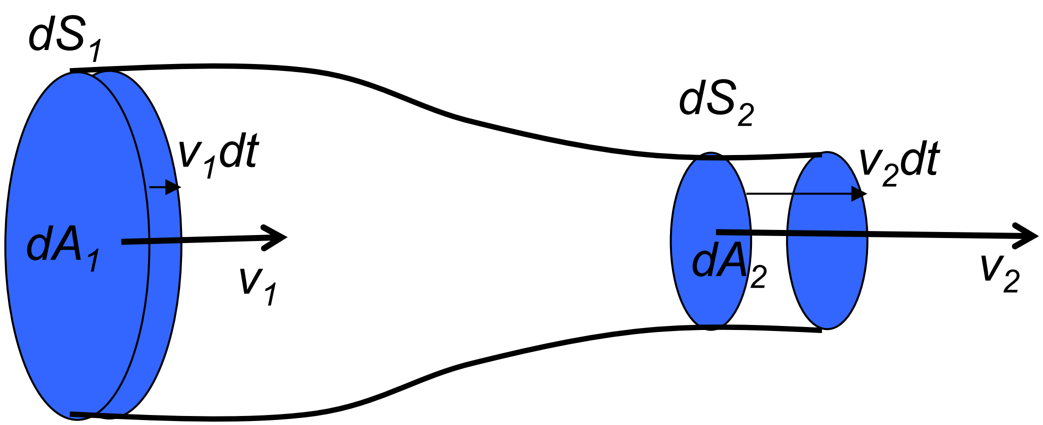
Supponiamo che il tubo di flusso cambi sezione. Siano dS_1 e dS_2 le sezioni diverse del tubo e consideriamo il volume di fluido contenuto nel tubo tra queste sezioni.

In <u>condizioni stazionarie</u> il fluido può soltanto entrare da dS_1 e uscire da dS_2 ma non dalla superficie laterale del tubo di flusso.

La massa entrante da dS_1 e quella uscente da dS_2 sono:

$$\mathbf{dm_1 = \rho_1 dV_1 = \rho_1 v_1 dA_1 dt}$$

$$\mathbf{dm_2 = \rho_2 dV_2 = \rho_2 v_2 dA_2 dt}$$



Equazione di continuità

Poiché la massa si conserva, esse devono essere uguali: $\mathbf{dm_1 = dm_2}$

Ovvero:

$$\boldsymbol{\rho_1 v_1 dA_1 = \rho_2 v_2 dA_2}$$

Se $\rho_1 = \rho_2$ (fluido incompressibile o incomprimibile) si ha:

$$\mathbf{v_1 dA_1 = v_2 dA_2}$$

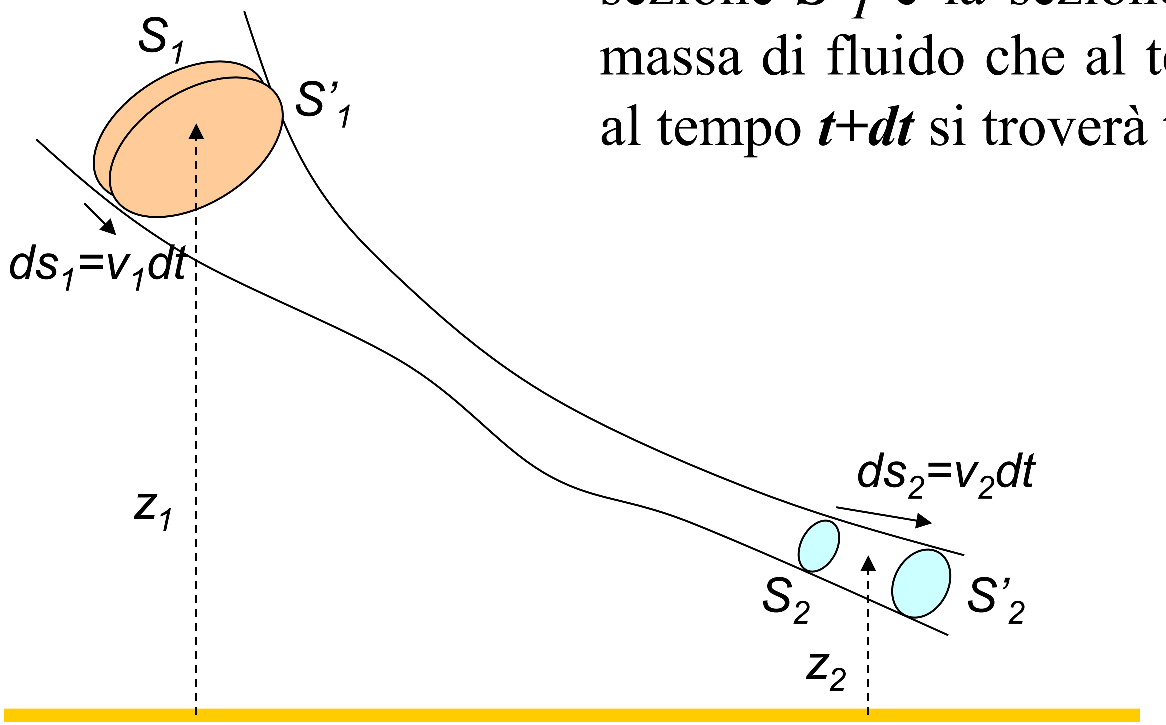
Per una superficie finita **S** dovremo integrare i contributi infinitesimi su tutta la superficie:

$$\boxed{\mathbf{v_1 S_1 = v_2 S_2}}$$

La costanza del flusso di massa prende il nome di equazione di continuità.

Legge di Bernoulli

Consideriamo un tubo di flusso e due sezioni perpendicolari S_1, S_2. Supponiamo che la velocità del fluido su ciascuna sezione abbia un valore uniforme v_1 e v_2.



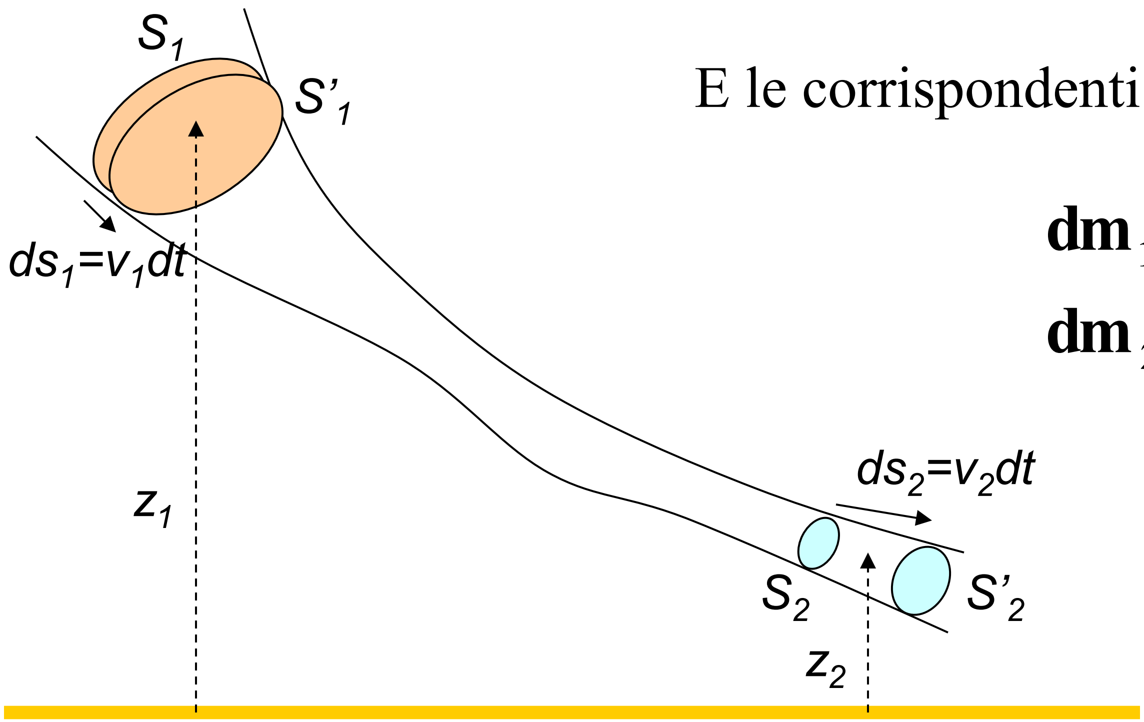
Nell'intervallo dt la sezione S_1 si trasformerà nella sezione S'_1 e la sezione S_2 nella sezione S'_2 e la massa di fluido che al tempo t si trova tra S_1 e S_2, al tempo $t+dt$ si troverà tra S'_1 e S'_2.

Legge di Bernoulli

Il volume dV di fluido contenuto tra le sezioni S_1 e S'_1 e quello contenuto tra S_2 e S'_2 è lo stesso:

$$dV = A_1 ds_1 = A_1 v_1 dt$$

$$dV = A_2 ds_2 = A_2 v_2 dt$$



E le corrispondenti masse sono pure uguali:

$$dm_1 = dm = \rho dV = \rho A_1 v_1 dt$$

$$dm_2 = dm = \rho dV = \rho A_2 v_2 dt$$

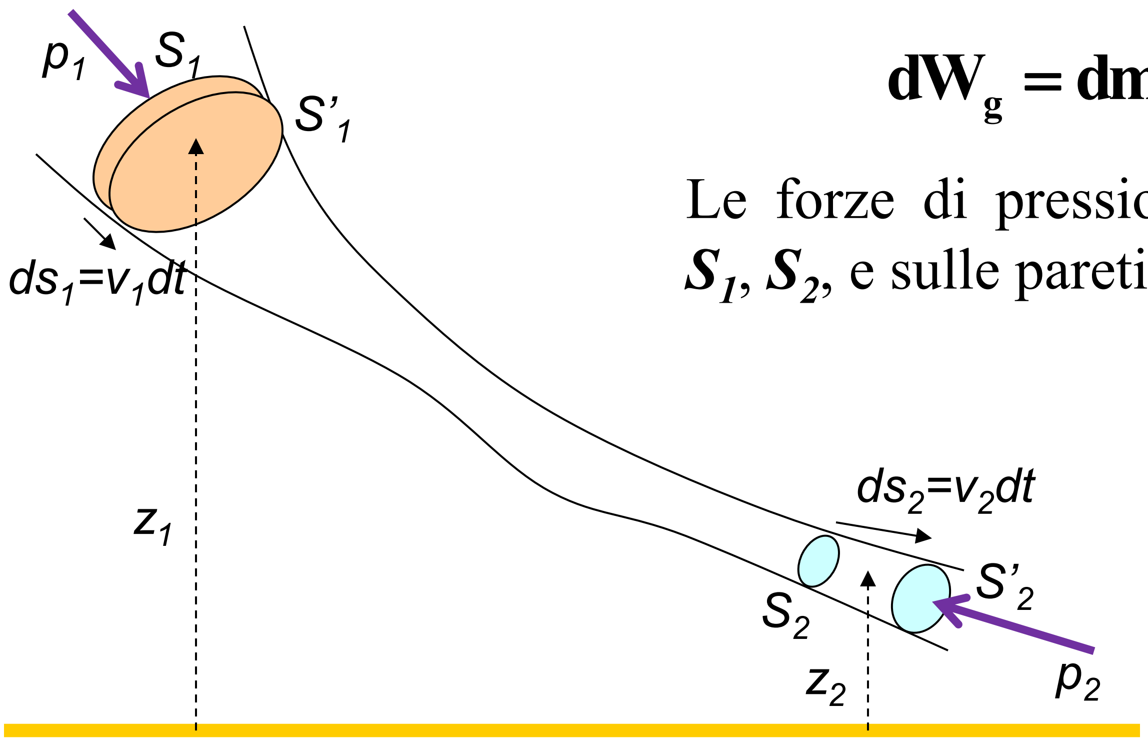
Legge di Bernoulli

Basterà quindi applicare la conservazione dell'energia meccanica alle due masse ***dm₁***, ***dm₂***. Il lavoro delle forze di pressione e di gravità deve essere uguale alla variazione di energia cinetica.

Lavoro della forze di gravità:

$$\mathbf{dW_g = dm\, g\left(z_1 - z_2\right)}$$

Le forze di pressione agiscono sulle sezioni $\boldsymbol{S_1}$, $\boldsymbol{S_2}$, e sulle pareti laterali del tubo.

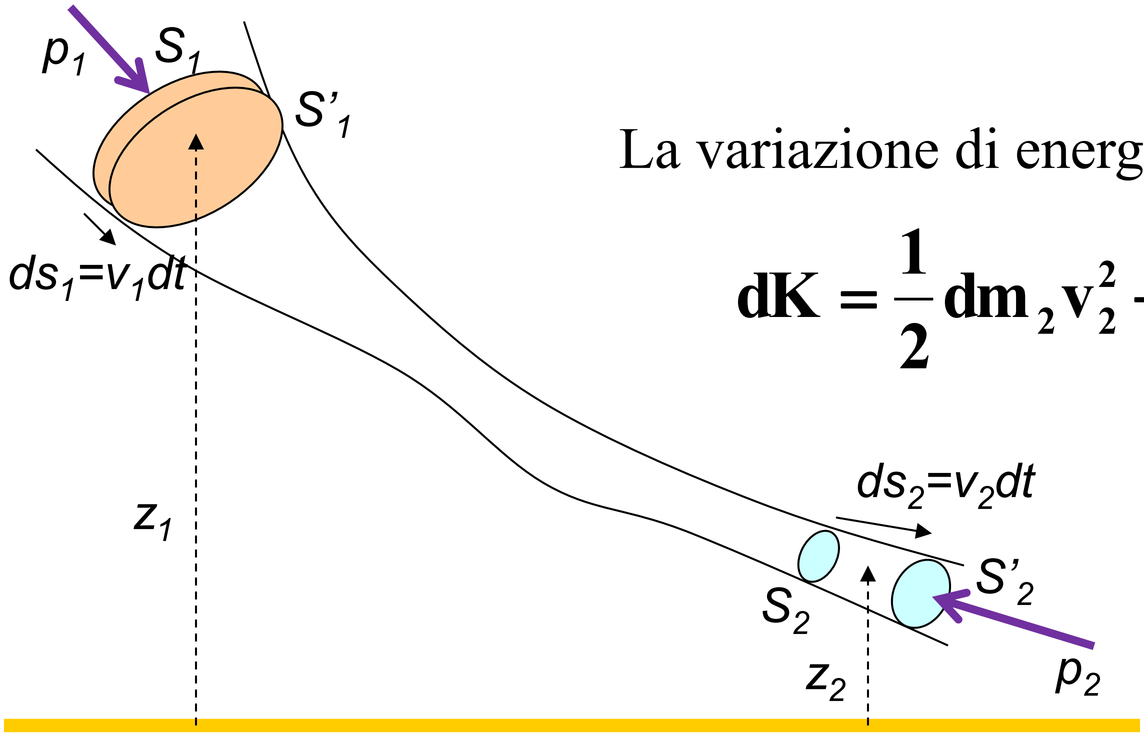


Legge di Bernoulli

Queste ultime compiono lavoro nullo, in quanto in assenza di viscosità la forza è perpendicolare alla superficie laterale e quindi al moto del fluido.

Il lavoro delle forze agenti sulle sezioni è:

$$\mathbf{dW_p = p_1 dV_1 - p_2 dV_2 = (p_1 - p_2) dV}$$



La variazione di energia cinetica è:

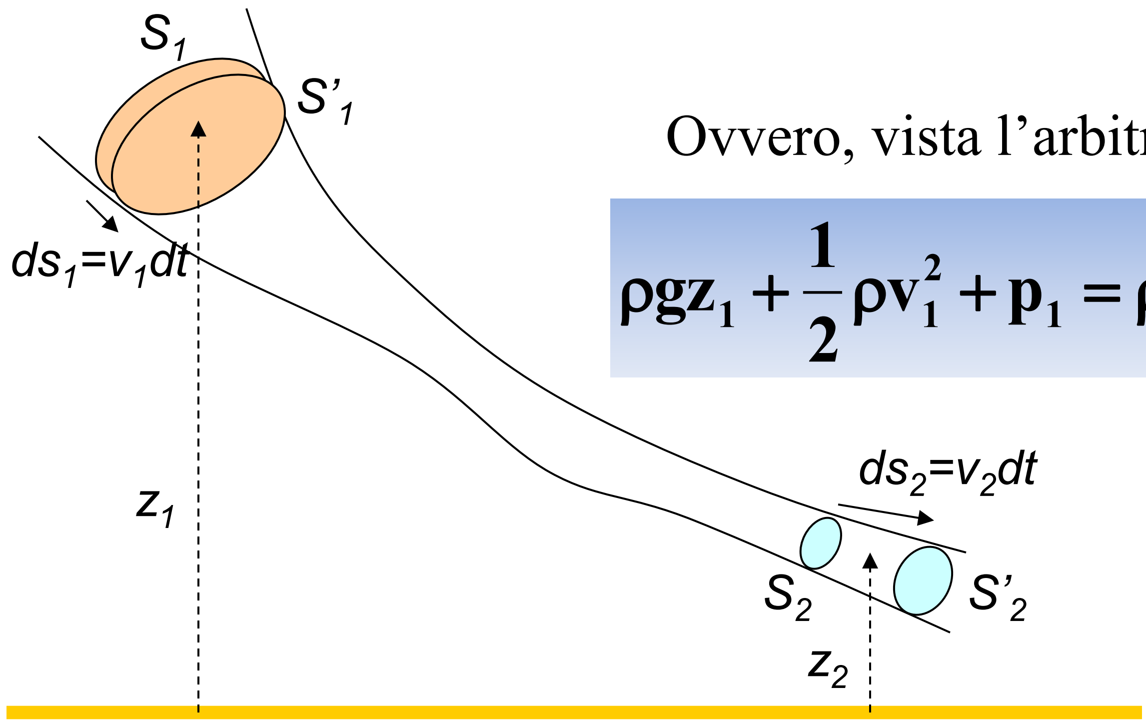
$$\mathbf{dK = \frac{1}{2} dm_2 v_2^2 - \frac{1}{2} dm_1 v_1^2 = \frac{1}{2} dm \left(v_2^2 - v_1^2\right)}$$

Legge di Bernoulli

Abbiamo dunque: $$\mathbf{dW_g + dW_p = dK}$$

$$\mathbf{dm\ g(z_1 - z_2) + (p_1 - p_2)dV = \frac{1}{2}dm\left(v_2^2 - v_1^2\right)}$$

E dividendo per il volume: $$\boldsymbol{\rho} \mathbf{g(z_1 - z_2) + (p_1 - p_2) = \frac{1}{2}}\boldsymbol{\rho}\mathbf{\left(v_2^2 - v_1^2\right)}$$



Ovvero, vista l'arbitrarietà delle sezioni:

$$\boldsymbol{\rho} \mathbf{g z_1 + \frac{1}{2}}\boldsymbol{\rho}\mathbf{v_1^2 + p_1 =}\ \boldsymbol{\rho}\mathbf{g z_2 + \frac{1}{2}}\boldsymbol{\rho}\mathbf{v_2^2 + p_2 = const.}$$

Legge di Bernoulli

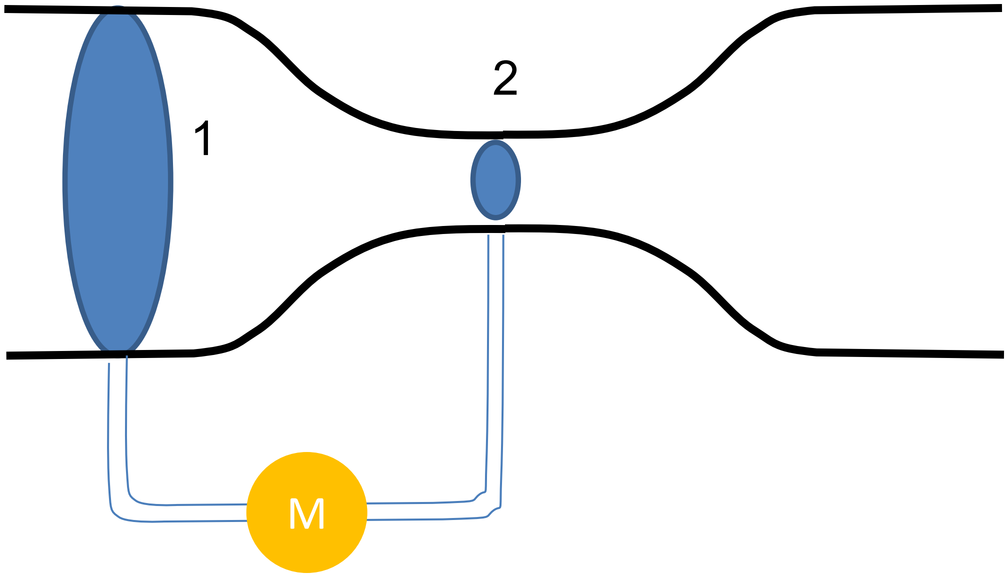
I risultati calcolati con questa legge sono casi limite, poiché in un fluido reale bisogna sempre spendere lavoro contro gli attriti.

Quindi la variazione di velocità del fluido sarà minore di quanto calcolato.

$$\rho g z + \frac{1}{2}\rho v^2 + p = \text{const.}$$

Tubo di Venturi

Serve per misurare la velocità e la portata di un fluido in un condotto.



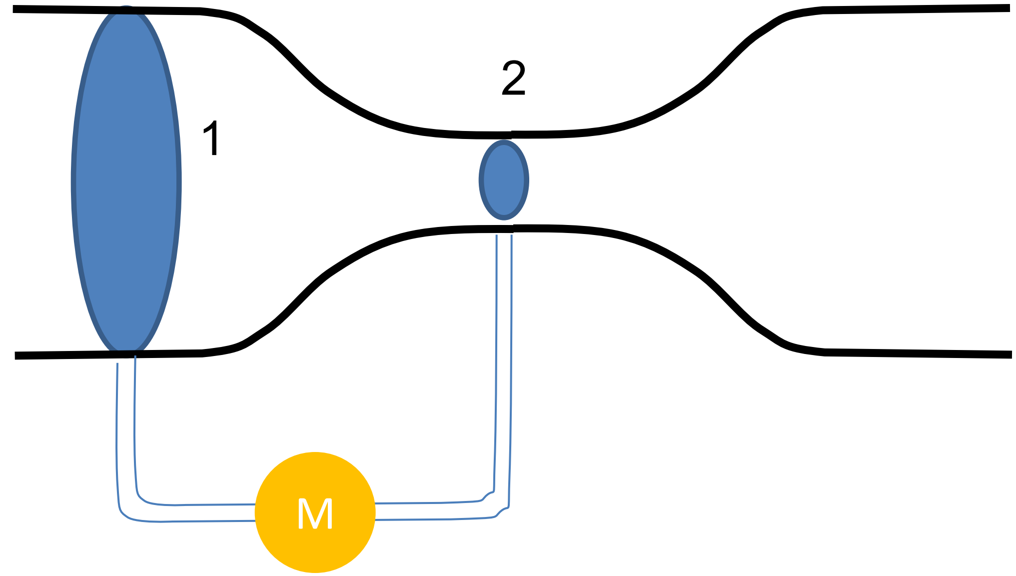
E` dotato di un manometro differenziale M per la misura della pressione

Applichiamo la legge di Bernoulli alle sezioni 1 e 2, entrambe alla stessa quota media *z*:

$$\frac{1}{2}\rho v_1^2 + p_1 = \frac{1}{2}\rho v_2^2 + p_2$$

$$v_2^2 - v_1^2 = \frac{2}{\rho}(p_1 - p_2)$$

Tubo di Venturi



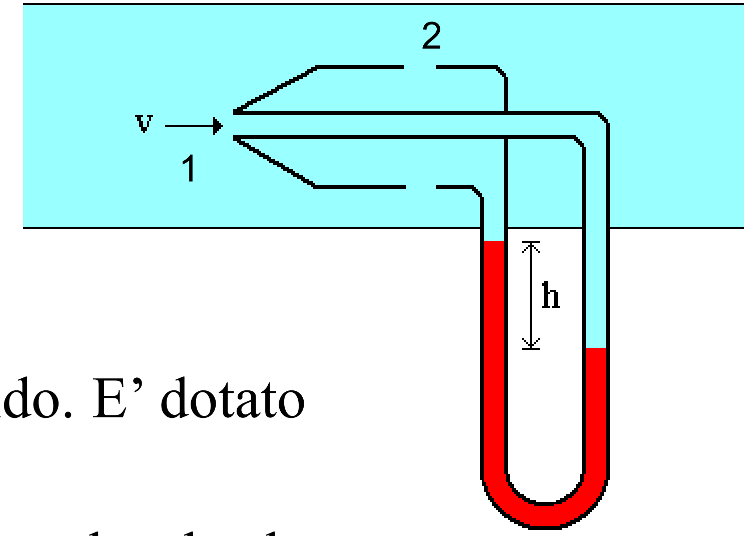
Usando l'equazione di continuità, possiamo esprimere la velocità in 2 in termini della velocità in 1:

$$\mathbf{A_1 v_1 = A_2 v_2} \qquad\qquad \mathbf{v_2 = \frac{A_1}{A_2} v_1}$$

Per la velocità otteniamo:

$$\mathbf{v_1 = \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_1 - p_2)\frac{A_2^2}{A_1^2 - A_2^2}}}$$

Tubo di Pitot



Serve per misurare la velocità di un fluido. E' dotato di un manometro differenziale.

Applichiamo la legge di Bernoulli, notando che la velocità del fluido nel punto 1 è nulla.

$$\mathbf{p_1 = \frac{1}{2}\rho v_2^2 + p_2}$$

Ne segue:

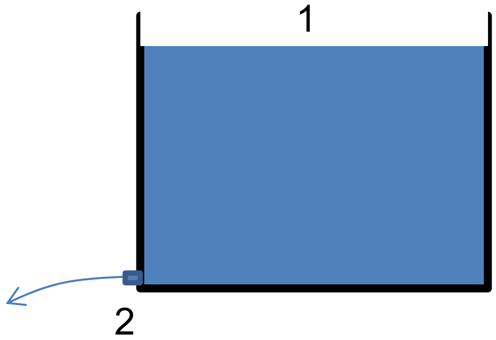
$$\mathbf{v_2 = \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_1 - p_2)}}$$

p_1 e\` anche detta *pressione totale* e *$p_2$ pressione statica*, mentre il termine *$1/2\rho v^2$* e\` detto *pressione dinamica*

Legge di Torricelli

Descrive la velocità di efflusso di un bacino. Applichiamo Bernoulli notando che la pressione nei punti 1 e 2 è uguale a quella atmosferica, quindi:

$$\rho g z_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + p_1 = \rho g z_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + p_2$$



Applichiamo la conservazione della portata alle sezioni 1 e 2:

$$g z_1 + \frac{1}{2} v_1^2 = g z_2 + \frac{1}{2} v_2^2$$

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Legge di Torricelli

Se $A_1 >> A_2$, la velocità v_1 è trascurabile e otteniamo:

$$\mathbf{gz_1 \cong gz_2 + \frac{1}{2} v_2^2}$$

$$\mathbf{v_2 \approx \sqrt{2g(z_1 - z_2)}}$$

Che è uguale alla velocità di caduta libera dalla medesima altezza.

Meccanica dei fluidi in sistemi biologici

La circolazione del sangue in esseri viventi è senza dubbio una delle più interessanti applicazioni della fluidodinamica: si tratta di un moto pulsato di un liquido reale non omogeneo in condotti non rigidi con struttura geometrica complicata.

Gli strumenti a nostra disposizione ci permettono di affrontare il problema ipotizzando un moto stazionario di un liquido reale omogeneo in condotti con parete rigide.

IL CIRCUITO IDRODINAMICO DEL SANGUE

Il sistema circolatorio costituisce un sistema idrodinamico chiuso. Il sangue viene pompato dal ventricolo sinistro nell'aorta e da qui si distribuisce in un sistema di arterie minori, le quali a loro volta si diramano in una rete di arteriole. Dalle arteriole il sangue accede alla rete dei capillari, nei quali avviene lo scambio di ossigeno, di anidride carbonica e di sostanze nutritive e di scarto tra il sangue ed i tessuti. I capillari confluiscono in un sistema di venule e quindi vene. Il sangue venoso raggiunge l'atrio destro mediante la vena cava e da qui viene pompato nel ventricolo destro e successivamente nel sistema di vasi polmonari, dove ha luogo lo scambio di ossigeno e di anidride carbonica con l'aria contenuta negli alveoli polmonari. Il sistema circolatorio polmonare termina nell'atrio sinistro, da questo si passa al ventricolo sinistro, da dove ricomincia il circolo sopra descritto.

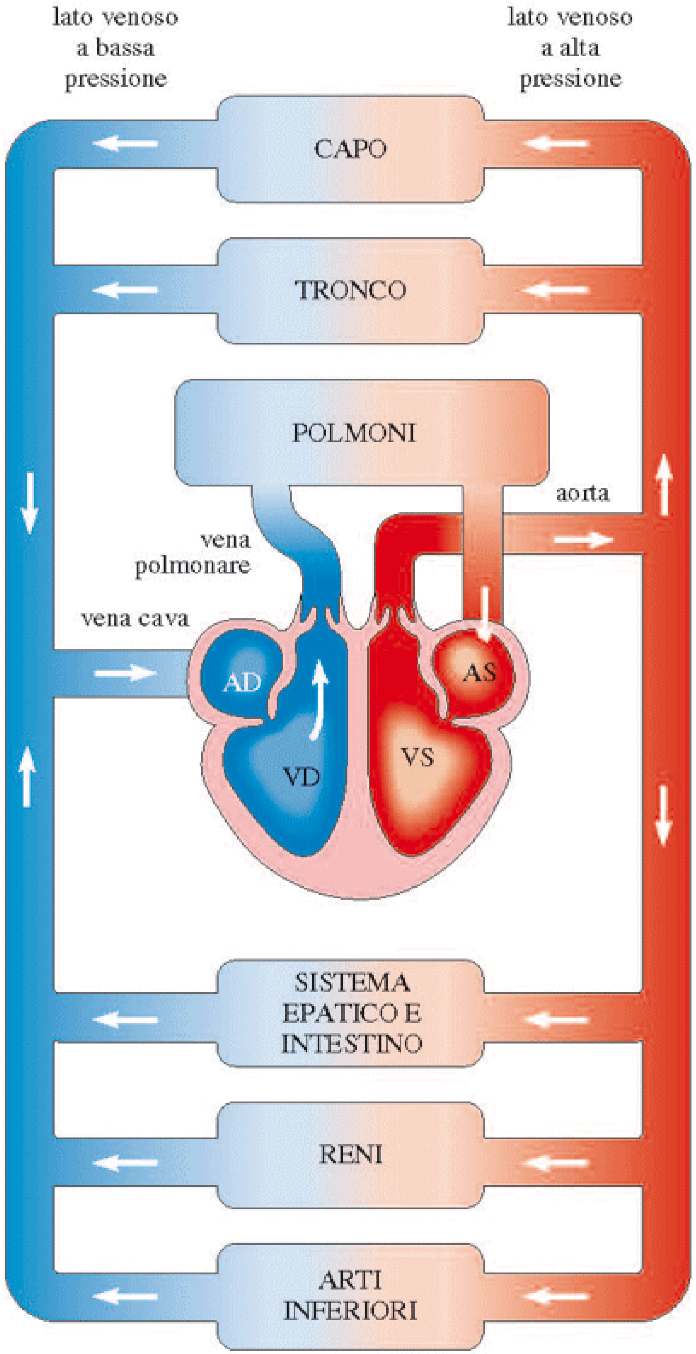


Figura 5.2

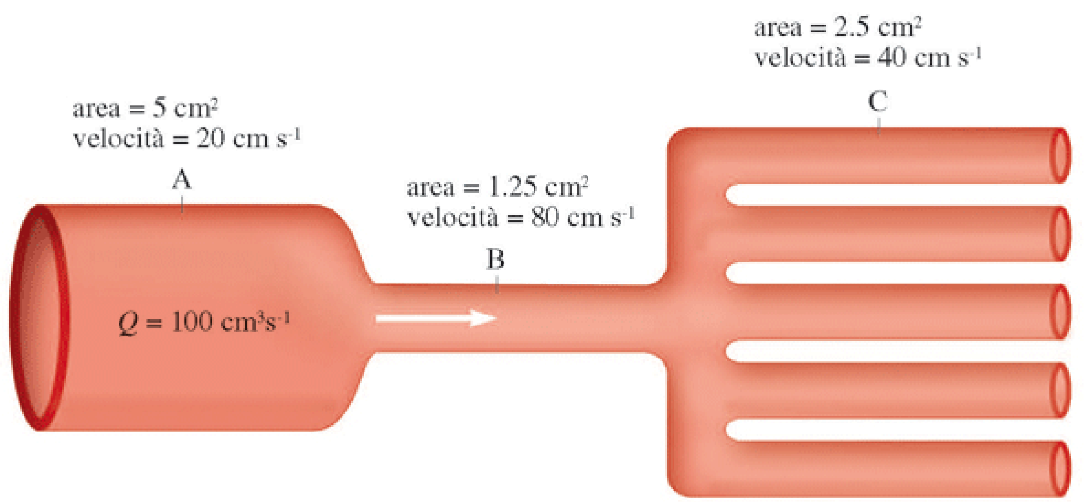
Schema del sistema circolatorio. I condotti sia nel grande circolo, sia nel circuito polmonare si diramano a partire dall'aorta (o dalla vena polmonare) in arterie di calibro sempre minore, poi in arteriole, queste in capillari, attraverso le cui pareti avvengono gli scambi di sostanze alle e dalle cellule (Cap. 10). I capillari si riuniscono poi in venule, queste in vene che riportano il sangue al cuore (vena cava e vena polmonare).

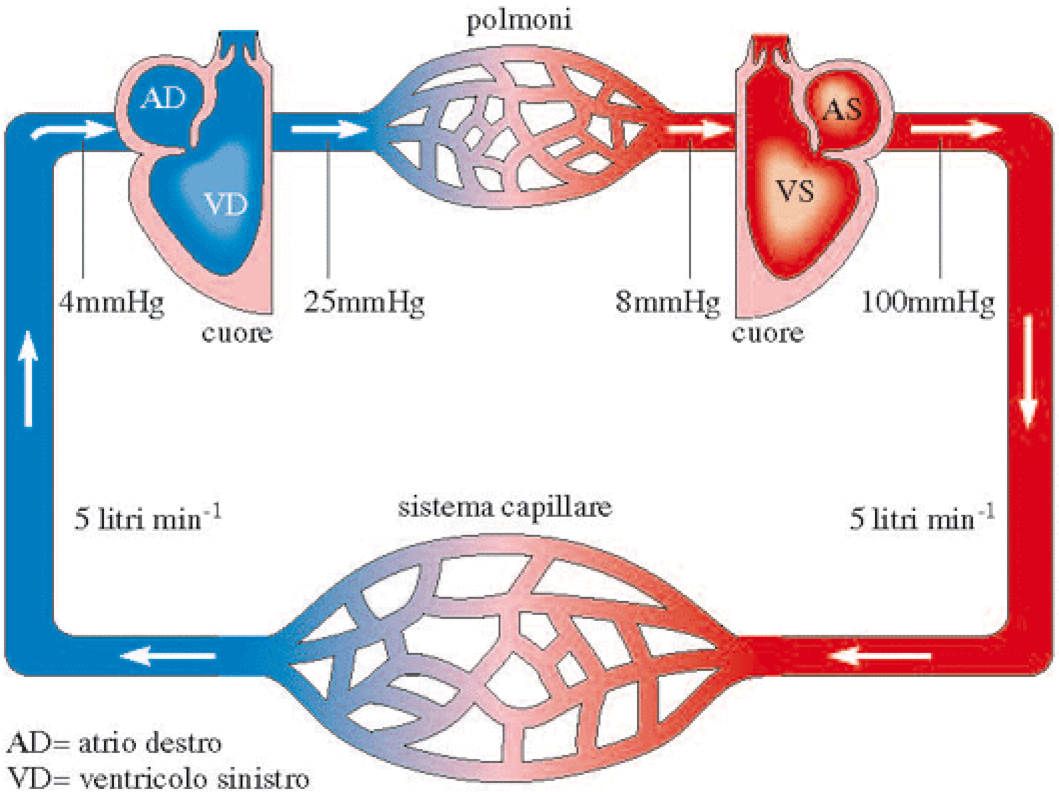
LEGENDA: AD = atrio destro, VD = ventricolo destro, AS = atrio sinistro, VS = ventricolo sinistro.

Applicazione dell’equazione di continuità

La sezione B (1,25 cm^2) è ¼ della sezione A (5 cm^2) e quindi in B la velocità è 4 volte superiore rispetto ad A. In C una singola sezione è 0,5 cm^2 ma ci sono 5 condotti per una sezione totale pari a 2,5 cm^2, doppia rispetto a B e quindi la velocità risulta la metà di quella in B.

Figura 5.4
Variazione della velocità in un sistema idrodinamico avente portata costante e condotti rigidi. Nella sezione C abbiamo 5 condotti uguali di sezione pari a 0.5 cm^2; l'area totale attraversata dal volume di fluido nella sezione C è di 2.5 cm^2.





AD= atrio destro
VD= ventricolo sinistro
AS= atrio sinistro
VS= ventricolo sinistro

Figura 5.3

Circuito idrodinamico equivalente a quello del sistema circolatorio. Sono riportati i valori normali, mediati nel tempo, delle portate e delle pressioni in ingresso e in uscita dal cuore. La pressione indicata è relativa a quella esterna al circuito.

Scannicchio
Fisica biomedica
EdiSES

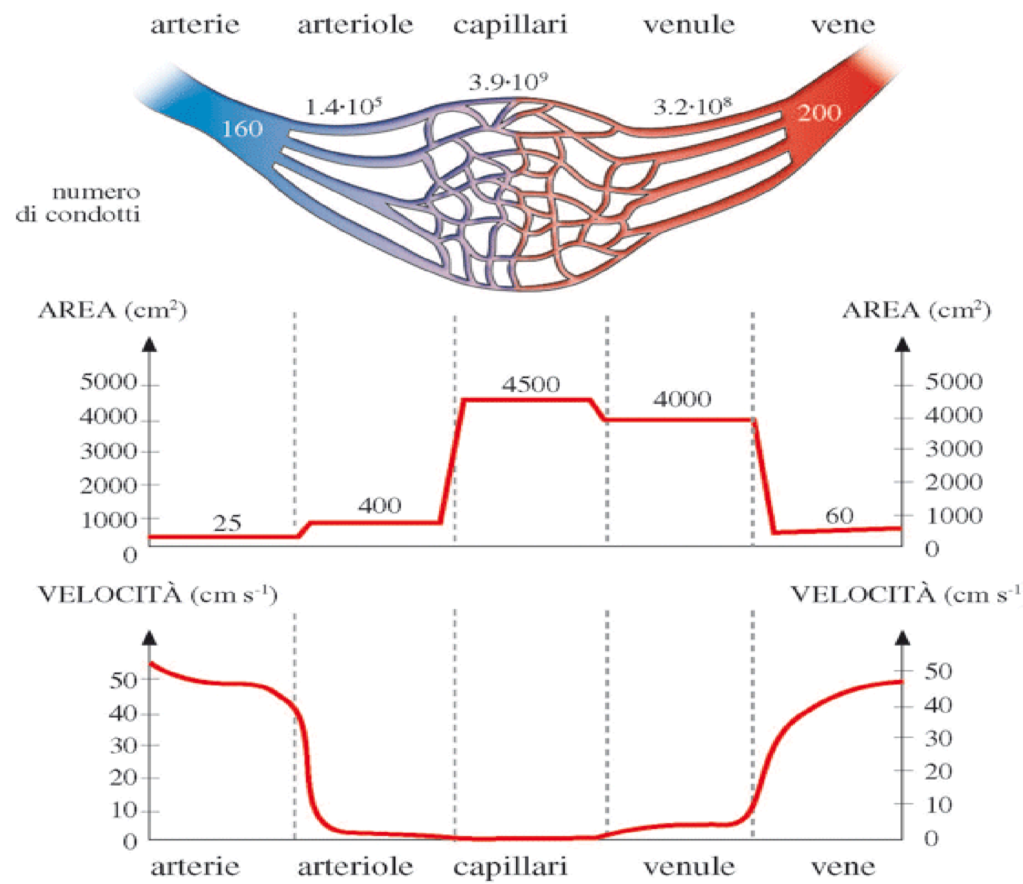
Portata dei vasi e velocità del sangue

Il volume totale di sangue di una persona adulta è di circa 6 litri. Tale volume viene fatto circolare dal cuore con una certa velocità. Nel sistema circolatorio di una persona adulta la portata media è di circa 5 litri al minuto. Questa portata media è costante, nel senso che la quantità di sangue che esce dal cuore nell'unità di tempo è la stessa che attraversa una sezione complessiva di un qualsiasi distretto vascolare nella stessa unità di tempo.

Il diametro della aorta è di circa 2 cm, quindi l'area è pari a 3,14 cm^2 circa. Considerando una portata di 5 litri/min (circa 83 cm^3/s) si ha che la velocita media è di circa 26 cm/s.

Figura 5.5

Rappresentazione schematica della variazione di sezione totale e di velocità *media* del sangue nei vari distretti del sistema circolatorio. La velocità nei capillari è molto bassa, dell'ordine del millimetro al secondo. Viene riportato anche il numero dei condotti nei vari distretti.



Applicazione del teorema di Bernoulli. Calcolo della pressione laterale esercitata dal sangue sulla parete di una arteria in corrispondenza di un **aneurisma** (rigonfiamento), fig. a) o di una **stenosi** (strozzatura), fig. b) in configurazione orizzontale. In corrispondenza dell'aneurisma la velocità del sangue si riduce e quindi la pressione aumenta e quindi non si oppone al rigonfiamento che quindi peggiora in modo irreversibile. Analogamente nella stenosi.

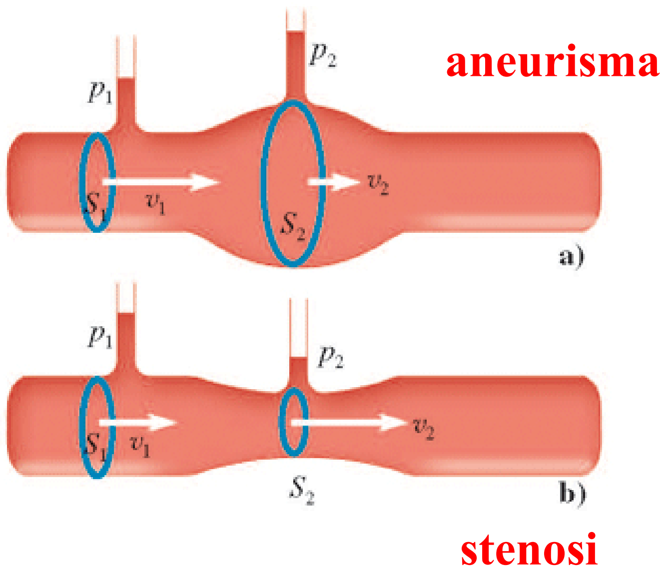


Figura 5.7
Rappresentazione schematica di un aneurisma (**a**) e con l'indicazione dei valori assunti dalla pressione sulle pareti del condotto di una stenosi (**b**). Vedi altezza del liquido nelle canne manometriche. Dispositivi simili alla Figura (**b**) permettono misure di velocità del fluido (tubo di Venturi), vedi Esempio 5.1.