

Meccanica dei fluidi

1^a parte

Corso di Fisica
A.A. 2024-2025



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

1

Sommario

- Introduzione alla statica e alla dinamica dei fluidi
- Concetti di densità, sforzo e pressione
- Equilibrio nei fluidi
- Principio di Pascal
- Esempi:
 - siringa,
 - cannuccia,
 - sollevatore e freno idraulici,
 - manovra di Heimlich
- Pressione idrostatica
- Legge di Stevino
- Pressione atmosferica e strumenti di misura
- Spinta di Archimede e galleggiamento
- Vasi comunicanti



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

4

Sommario

- Moto nei fluidi:
 - Fluidi ideali
 - Portata
 - Equazione di continuità
- Fluidi non viscosi:
- Teorema di Bernoulli
 - Legge di Torricelli
 - Legge di Stevino
 - Tubo di Venturi
 - Tubo di Pitot



Introduzione



Idrostatica e Fluidodinamica

- L'**idrostatica** (*statica dei fluidi* o *fluidostatica*) è quella parte della Fisica che studia lo stato di quiete dei fluidi (liquidi o gas) e che consente di studiare lo stato di equilibrio dei fluidi.
- La **fluidodinamica** (*dinamica dei fluidi*, *fluidodinamica* o *idrocinamica*) tratta lo studio del moto dei fluidi e delle cause che lo determinano.
- Così come la Cinematica e la Dinamica fanno parte della Meccanica
- Analogamente l'idrostatica e la fluidodinamica fanno parte della Meccanica dei fluidi

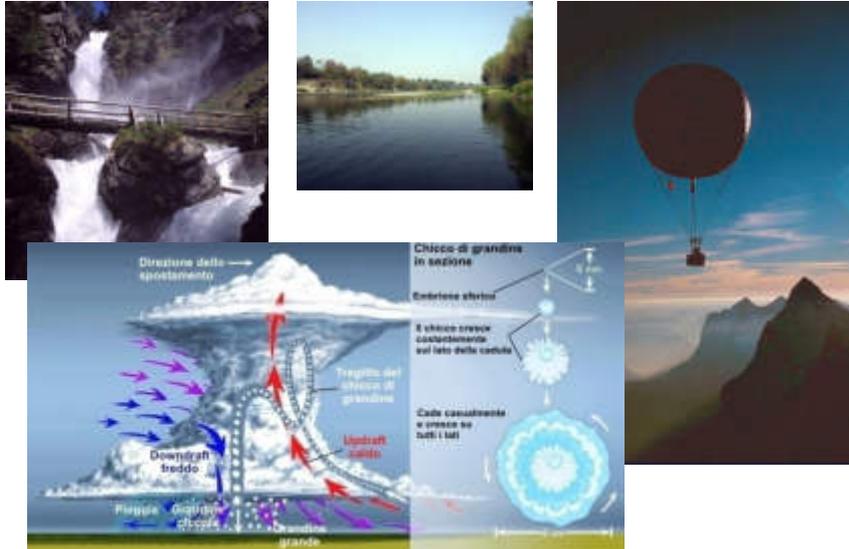


I fluidi e il mondo intorno a noi

- I fluidi (da fluire) possono ritrovarsi in due differenti stati delle sostanze e della materia: *liquido* e *gas (aeriforme)*
- Troviamo i fluidi ovunque.
 - Aria e gas (che respiriamo)
 - Acqua che beviamo
 - Gas disciolti in liquidi (Bevande)
 - ...
 - etc...



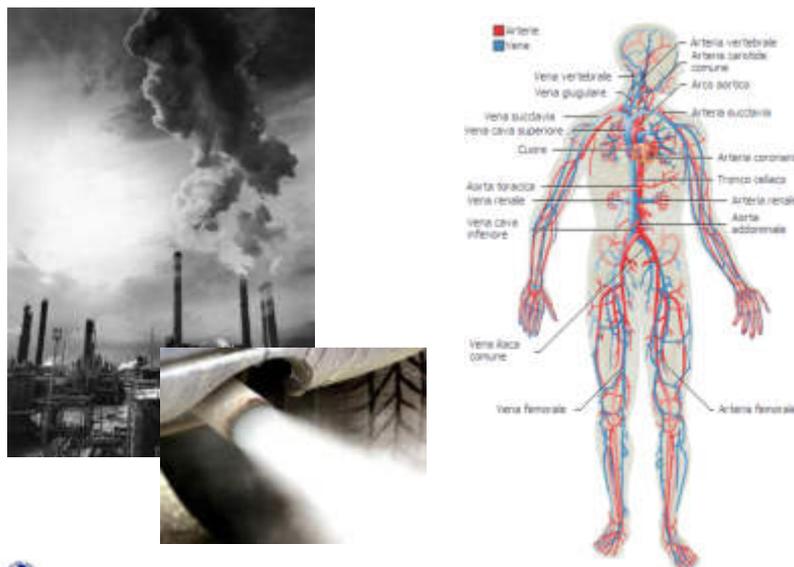
I fluidi e il mondo intorno a noi



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

13

I fluidi e il mondo intorno a noi



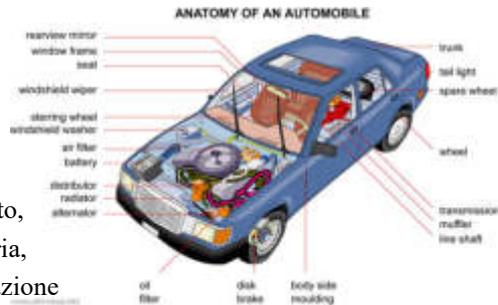
Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

14

I fluidi e il mondo intorno a noi

- In un'automobile ci sono fluidi nei

- pneumatici,
- nel serbatoio,
- nel radiatore,
- nella batteria,
- nel tubo di scappamento,
- nel condizionatore d'aria,
- nel sistema di lubrificazione
- nelle camere di combustione del motore,
- nel serbatoio per la pulitura del parabrezza,
- nel sistema di frenatura idraulica (Idraulico significa funzionante per mezzo di un liquido).



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

16

Energia

- L'energia cinetica di un fluido in movimento è utilizzata nei mulini a vento, e l'energia potenziale di un altro fluido aziona le turbine delle centrali idroelettriche.
- I fluidi sono in grado di modellare la superficie terrestre.



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

17

Trasporti



Statica dei fluidi

- DEF:
 - *un fluido è in quiete quando lo è il contenitore in cui si trova e quando il moto delle particelle avviene in maniera del tutto disordinata e casuale.*



Concetto di densità

(massa volumica)



Concetto di densità (massa volumica)

- I fluidi, sia i *liquidi* che i *gas*, sono caratterizzati da una completa deformabilità.
- Qui tratteremo essenzialmente i *liquidi*.
 - questi, a differenza dei gas, sono molto “*poco comprimibili*” e pertanto lo studio della Statica e della Dinamica dei liquidi può essere notevolmente semplificato.
- A causa della loro deformabilità, la massa dei fluidi è distribuita con continuità in tutto il volume occupato dal fluido stesso.



Concetto di densità (massa volumica)

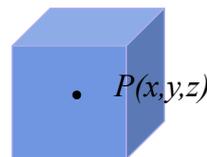
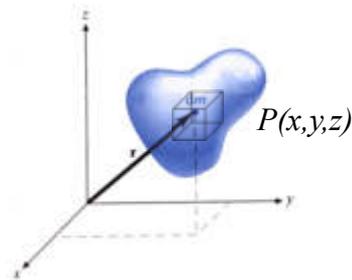
- Con i fluidi siamo interessati
 - alle proprietà che variano da punto a punto nella sostanza estesa
 - più che a quelle di una specifica parte della stessa sostanza (*anziché trattare i corpi come oggetti solidi ed impiegando grandezze come massa e forza nella Legge di Newton*).
- Due concetti nuovi
 - È più utile parlare di **densità** (massa volumica) e di **pressione** piuttosto che di massa e di forza.



Concetto di densità (massa volumica)

- Isoliamo un piccolo elemento di volume ΔV intorno al punto $P(x,y,z)$
- Misuriamo la massa Δm del fluido contenuto in tale elemento di volume.
- La densità (*massa volumica*) risulta definita come:

$$\rho(x, y, z) = \frac{\Delta m(x, y, z)}{\Delta V(x, y, z)}$$



Concetto di densità (massa volumica)

- Utilizzando i concetti del calcolo infinitesimale, si può definire una funzione scalare continua dei punti del fluido detta **densità** in un punto come il rapporto tra la massa infinitesima dm ed il volume infinitesimo dV , che racchiude il punto considerato.

$$\rho(x, y, z) = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m(x, y, z)}{\Delta V(x, y, z)} = \frac{dm}{dV}$$

- Quando tale funzione è costante in ogni punto si dice che la densità è *uniforme*.

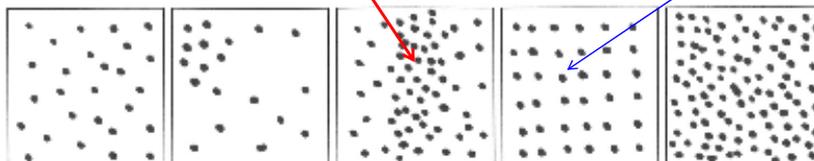


Concetto di densità (massa volumica)

- Assumendo un campione di fluido grande rispetto alle dimensioni atomiche e quindi «continuo» (con densità) possiamo affermare che:

$$\rho(x, y, z) = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} = \frac{dm}{dV}$$

$$\rho(x, y, z) = \frac{m}{V}$$



Concetto di densità (massa volumica)

- La **densità** è una funzione scalare.
- L'unità di misura nel sistema S.I. è il **kilogrammo per metro cubo**.

| Alcuni valori di massa volumica e densità | |
|--|-------------------------------------|
| Sostanza/oggetto | Massa volumica (kg/m ³) |
| Spatio interstellare | 10 ⁻²⁶ |
| Massimo vuoto raggiungibile in laboratorio | 10 ⁻¹⁷ |
| Aria a 20 °C e 1 bar | 1,21 |
| a 20 °C e 50 bar | 60,5 |
| Pulviscolo espanso | 3 · 10 ³ |
| Acqua a 20 °C e 1 bar | 0,998 · 10 ³ |
| a 20 °C e 50 bar | 1,000 · 10 ³ |
| Acqua del mare a 20 °C e 1 bar | 1,024 · 10 ³ |
| Stagno | 1,060 · 10 ³ |
| Ghiaccio | 0,917 · 10 ³ |
| Ferro | 7,9 · 10 ³ |
| Mercurio | 13,6 · 10 ³ |
| Terra: valor medio | 5,5 · 10 ³ |
| nucleo | 9,5 · 10 ³ |
| crosta | 2,8 · 10 ³ |
| Sole: valor medio | 1,4 · 10 ³ |
| nucleo | 1,6 · 10 ⁵ |
| Stella nana bianca (nucleo centrale) | 10 ¹⁰ |
| Nucleo dell'uranio | 3 · 10 ¹⁷ |
| Stella di neutroni (nucleo centrale) | 10 ¹⁸ |
| Buco nero (1 massa solare) | 10 ¹⁸ |



| Densità di alcune sostanze (in kg/m ³) | |
|--|--------|
| Piombo | 21 500 |
| Oro | 19 300 |
| Mercurio | 13 590 |
| Argento | 10 500 |
| Rame | 8960 |
| Ferro | 7870 |
| La Terra | 5517 |
| Alluminio | 2960 |
| Il Sole | 1410 |
| Ghiaccio | 920 |
| Il corpo umano | 1070 |
| Acqua (a 4 °C) | 1000 |
| Olio d'oliva | 920 |
| Ghiaccio | 917 |
| Aria (a livello del mare) | 1,29 |
| Aria (a 20 km di altezza) | 0,09 |



Unità di misura della densità

- Nel S.I. la densità si misura in kg/m³
- Come si passa da g/cm³ a kg/m³

$$1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 1 \frac{10^{-3} \text{kg}}{10^{-6} \text{m}^3} = 10^{-3} \cdot 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \xrightarrow{\cdot 1000} 1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 10^{-3} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

- Esempio: olio, densità $\rho = 0,92 \text{ g/cm}^3$

$$0,92 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 0,92 \frac{10^{-3} \text{kg}}{10^{-6} \text{m}^3} = 0,92 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,92 \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$0,92 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 920 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$0,92 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \xrightarrow{\cdot 1000} 920 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$



Densità (Massa volumica)

| Materiale | Densità (kg/L) | Densità (kg/m ³) |
|-------------|----------------|------------------------------|
| Platino | 20,46 | 20460 |
| Mercurio | 13,53 | 13530 |
| Ferro | 7,86 | 7860 |
| Alluminio | 2,70 | 2700 |
| Glicerina | 1,26 | 1260 |
| Latte | 1,03 | 1030 |
| Acqua | 1,00 | 1000 |
| Corpo umano | 0,98 | 980 |
| Olio | 0,92 | 920 |
| Benzina | 0,68 | 680 |
| Ossigeno | 0,00143 | 1,43 |
| Aria | 0,00129 | 1,29 |



Misura della densità di un solido

Densità di un solido

Per misurare la densità di un oggetto servono due informazioni: il volume e la massa dell'oggetto. Per ottenere la massa di un oggetto solido bisogna pesarlo su una bilancia; in questo caso 103 g. Per calcolare il volume dell'oggetto si immerge l'oggetto nell'acqua: la differenza nel livello dell'acqua, in questo caso 27 ml, è il volume. La densità dell'oggetto è pari alla massa divisa per il volume: $103 \text{ g} / 27 \text{ ml} = 3,81 \text{ g/ml}$ o $3,81 \text{ g/cm}^3$.

1. Densità di un solido 1 di 3 Encarta



Misura della densità di un liquido

Densità di un liquido

Per determinare la densità di un liquido, ad esempio l'acqua, occorre pesare un contenitore graduato vuoto; quindi occorre pesare nuovamente il contenitore dopo averlo riempito con il liquido. La differenza fra le masse, in questo caso $93\text{ g} - 43\text{ g} = 50\text{ g}$, è la massa dell'acqua. Il volume dell'acqua, 50 ml, è quello indicato dal contenitore graduato. La densità dell'acqua è pari alla massa divisa per il

2. Densità di un liquido 2 di 3 Encarta



Misura della densità di un gas

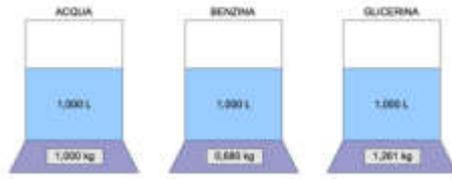
Densità di un gas

Per determinare la densità di un gas, occorre pesare un contenitore vuoto di volume noto, quindi pesarlo nuovamente dopo averlo riempito con il gas. La differenza fra le masse, in questo caso $110,2\text{ g} - 110\text{ g} = 0,2\text{ g}$, è la massa del gas. Il volume del gas, 500 ml, è quello del contenitore. La densità del gas è pari alla massa divisa per il volume: $0,2\text{ g}/500\text{ ml} = 0,0004\text{ g/ml}$ o $0,0004\text{ g/cm}^3$.

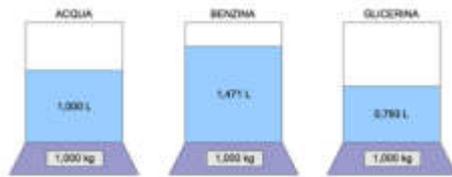
3. Densità di un gas 3 di 3 Encarta



Volume, peso e densità



| Materiale | Densità (kg/L) | Densità (kg/m ³) |
|-----------|----------------|------------------------------|
| Glicerina | 1,26 | 1260 |
| Acqua | 1,00 | 1000 |
| Benzina | 0,68 | 680 |

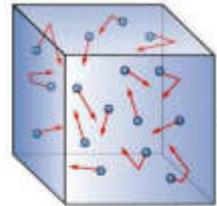


Concetto di pressione



Concetto di pressione

- Non è conveniente esprimere la Meccanica dei fluidi in termini di *campi di forza*.
- Ciò a causa della deformabilità dei liquidi e delle specificità dei gas.

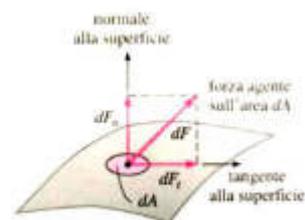


- È invece più conveniente introdurre una quantità fisica, la **pressione**, che permette di descrivere la distribuzione continua delle forze sia sulla superficie che all'interno del fluido.



Concetto di Sforzo

- Si definisce **sforzo** il rapporto tra una forza e l'area su cui essa agisce.
- Lo sforzo ha, pertanto, le dimensioni di una forza diviso un'area
 - **sforzo normale**: componente perpendicolare alla superficie
 - **sforzo tangenziale (sforzo di taglio)**: componente tangente alla superficie



- Un fluido in quiete non è sottoposto a sforzi tangenziali, non essendovi movimento relativo fra particelle vicine.
- Una particella di fluido in quiete è, quindi, sottoposta solo a sforzo normale.
- Per un fluido in quiete, il modulo dello sforzo è, quindi, indipendente dall'inclinazione dell'elemento di superficie. A tale modulo viene dato il nome di **pressione**.



$$\text{sforzo normale} \quad \sigma = \frac{dF_n}{dA}$$

$$\text{sforzo tangenziale} \quad \tau = \frac{dF_t}{dA}$$

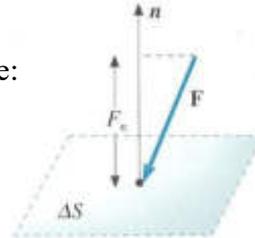


Concetto di pressione

- Consideriamo una porzione di superficie ΔS all'interno di un fluido o sulla superficie di esso.
- Data una forza F che agisce su ΔS
- Data F_N la componente di tale forza normale a ΔS

- Si definisce **pressione** la quantità scalare:

$$p(x, y, z) = \frac{\vec{F}(x, y, z) \cdot \hat{n}(x, y, z)}{\Delta S} = \frac{F_N(x, y, z)}{\Delta S}$$



- La pressione si misura dunque nel Sistema Internazionale in $Newton/m^2$, chiamato **pascale** (Pa)



Concetto di pressione

- Anche la *pressione*, come la *densità*, può essere definita in un punto del fluido, considerando una superficie infinitesima dS che contenga il punto stesso.

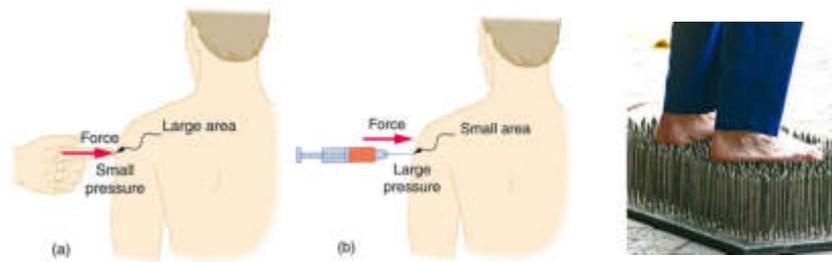
$$\rho = \rho(x, y, z) \quad p = p(x, y, z)$$

- Pertanto nella meccanica dei fluidi si possono sostituire i campi vettoriali di forze con dei campi scalari di pressione.

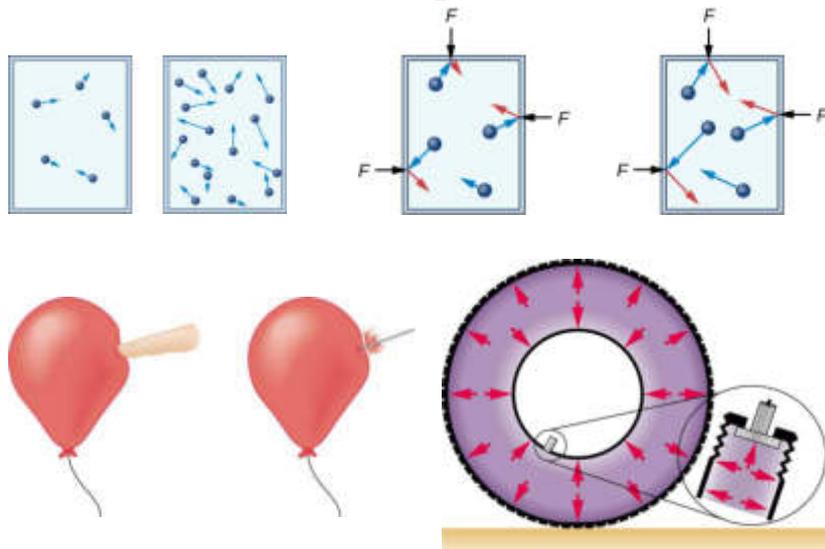
$$\begin{aligned} m &\rightarrow \rho = \rho(x, y, z) \\ \vec{F}(x, y, z) &\rightarrow p = p(x, y, z) \end{aligned}$$



Concetto di pressione



Concetto di pressione



Misura della pressione

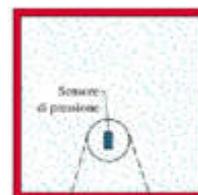


Pressione: Misura operativa

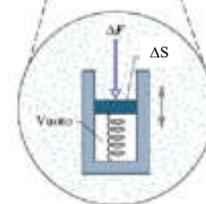
- Inseriamo un “ **sensore**” (come quello mostrato in figura) in un fluido.
- Definizione di pressione esercitata dal fluido sul pistone:

$$p = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta S}$$

- Sperimentalmente la pressione $p(x,y,z)$ definita in un dato punto $P(x,y,z)$ di un fluido a riposo ha lo stesso valore indipendentemente dall'orientamento del sensore (**isotropa**).
- La pressione, non avendo proprietà direzionali, è uno **scalare**.
- *La forza agente sul pistone del nostro sensore di pressione è un vettore, ma l'equazione coinvolge solo l'intensità della forza, una quantità scalare, e direzione e verso.*



(a)



(b)



Pressione: unità di misura (pascal)

- L'unità di misura della pressione nel sistema SI è il Newton al metro quadrato, che ha il nome di **pascal** (Pa).

$$1Pa = 1 \frac{N}{m^2} = 1 \frac{kg}{ms^2}$$

$$1 \text{ bar} \approx 1 \text{ atm} = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa} = 760 \text{ torr} = 14.7 \text{ lb/in}^2$$

- L'**atmosfera** (atm) è pressione media dell'atmosfera al livello del mare.
- Il **torr** (dal nome di Evangelista Torricelli, che inventò il barometro a mercurio nel 1674) è uguale al millimetro di mercurio ($mm \text{ Hg}$), la pressione che esercita una colonna di mercurio alta 1 mm .



Pressione: Valori tipici

TABELLA 15.2 Alcuni valori di pressione

| | Pressioni (Pa) |
|--|---------------------|
| Centro del Sole | $2 \cdot 10^{16}$ |
| Centro della Terra | $4 \cdot 10^{11}$ |
| Massima pressione raggiunta in laboratorio | $1.5 \cdot 10^{10}$ |
| Fossa oceanica più profonda, sul fondo | $1.1 \cdot 10^8$ |
| Tacchi a spillo su una pista da ballo | $1 \cdot 10^6$ |
| Pneumatici di un'automobile ^a | $2 \cdot 10^5$ |
| Pressione atmosferica al livello del mare | $1.0 \cdot 10^5$ |
| Pressione del sangue ^{a,b} | $1.6 \cdot 10^4$ |
| Massimo «vuoto» raggiungibile in laboratorio | 10^{-12} |

^a Pressione in eccesso a quella atmosferica.

^b Pressione sistolica, corrispondente a circa 120 torr sui misuratori di pressione per uso medico (sfigmomanometri).



Pressione: Valori tipici

Esempi di alcuni ordini di grandezza (valutata | molto valutata)

| | |
|-----------|--|
| → 10 nPa | Raggiungibile da una pompa turbomolecolare |
| 20 µPa | Soglia di percezione umana (linguisti) |
| 200 µPa | Pressione acustica di una stanza silenziosa |
| 2 nPa | Pressione acustica di una conversazione normale a 1 m |
| 25 nPa | Pressione acustica di un Microbot a 3 m a volume moderato |
| 100 nPa | Pressione atmosferica su Venere (dati del 1989 molto approssimativi) |
| 2 Pa | Pressione acustica in discoteca |
| 10 Pa | L'incremento di pressione ogni metro di profondità aggiunto sull'acqua |
| 100 Pa | Pressione acustica corrispondente alla soglia del dolore |
| 1 kPa | Pressione atmosferica su Marte |
| → 10 kPa | L'incremento di pressione alla profondità di 1 m sull'acqua, o la perdita di pressione quando si passa dal livello del mare a 1000 m di altitudine |
| 50 kPa | Ampliezza di un'onda di pressione che realizza lesioni irreversibili ai tessuti |
| → 100 kPa | La pressione atmosferica sulla Terra a livello del mare |
| 200 kPa | Le lince anticipando "spareo" l'acqua con questa pressione |
| → 1 MPa | Pressione alla quale si scioglie la targa |
| → 3 MPa | Pressione atmosferica su Venere |
| 50 MPa | Vapore nei surriscaldatori che alimenta una moderna turbina a vapore |
| 100 MPa | Le fionde alle Fosse delle Marianne |
| 1 GPa | Resistenza a trazione dei migliori acciai e della zirconia |
| → 10 GPa | Minimo necessario alla formazione dei diamanti |
| 100 GPa | Minimo necessario alla formazione dei nanotubi di carbonio |

Comparazione con altre unità di pressione

| | Equivale a pascal |
|----------------------------|-------------------|
| 1 bar | 100 000 |
| 1 millibar | 100 |
| 1 atmosfera fisica | 101 325 |
| 1 torr (mm Hg) | 133,322 |
| 1 mmH ₂ O | 9 806,65 |
| 1 pollice Hg ²¹ | 3 386 |
| 1 psi | 6 895 |

| Pascal | Equivale a |
|---|------------|
| 0,00001 bar | |
| 0,01 millibar | |
| $9,86923 \times 10^{-6}$ atmosfere fisiche | |
| $7,50064 \times 10^{-3}$ torr (mm Hg) | |
| $1,01375 \times 10^{-4}$ mmH ₂ O | |
| $2,95334 \times 10^{-4}$ pollici Hg ²¹ | |
| $1,45033 \times 10^{-4}$ psi | |



Unità di pressione e fattori di conversione

| | Pascal | bar | N/mm ² | kg/m ² | kg/cm ² (=1 at) | atm | Torr |
|-----------------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------------|------------------------|--------|
| 1 Pa (N/m ²)= | 1 | 10 ⁻⁵ | 10 ⁻⁶ | 0,102 | 0,102×10 ⁻⁴ | 0,987×10 ⁻⁵ | 0,0075 |
| 1 bar (daN/cm ²) = | 100 000 | 1 | 0,1 | 10 200 | 1,02 | 0,987 | 750 |
| 1 N/mm ² = | 10 ⁶ | 10 | 1 | 1,02×10 ⁵ | 10,2 | 9,87 | 7 501 |
| 1 kg/m ² = | 9,81 | 9,81×10 ⁻⁵ | 9,81×10 ⁻⁶ | 1 | 10 ⁻⁴ | 0,968×10 ⁻⁴ | 0,0736 |
| 1 kg/cm ² (1 at) = | 98 100 | 0,981 | 0,0981 | 10 000 | 1 | 0,968 | 736 |
| 1 atm (760 torr) = | 101 325 | 1,013 | 0,1013 | 10 330 | 1,033 | 1 | 760 |
| 1 torr = | 133 | 0,00133 | 1,33×10 ⁻⁴ | 13,6 | 0,00132 | 0,00132 | 1 |



Calcolo della pressione

- Pressione atmosferica a livello del mare

| | | | |
|--|-------------|---|-------------|
| Pascal [Pa, N/m ²] | 101325.024 | Newton a centimetro quadro [N/cm ²] | 10.1325024 |
| Chilopascal [kPa] | 101.325024 | Atmosfera [atm] | 1.01325024 |
| Megapascal [MPa] | 0.101325024 | Chilogrammo a centimetro quadro [kg/cm ²] | 1.0332277 |
| Psi [psi] | 1.472611556 | Libbra a piede quadro [lbf/ft ²] | 14.69594875 |
| Metro di colonna d'acqua (mca, m H ₂ O) | 10.3325619 | Libbra a piede quadro (lbf/ft ²) | 14.69594875 |
| Millimetro di mercurio [mmHg, Torr] | 760 | Piede colonna d'acqua [ftH ₂ O] | 3.345632526 |

- Pressione tipica di uno pneumatico

| | | | |
|--|--------------|---|------------|
| Pascal [Pa, N/m ²] | 220000 | Newton a centimetro quadro [N/cm ²] | 22 |
| Chilopascal [kPa] | 220 | Atmosfera [atm] | 2.1712912 |
| Megapascal [MPa] | 0.22 | Chilogrammo a centimetro quadro [kg/cm ²] | 2.2433757 |
| Psi [psi] | 319.326 | Libbra a piede quadro [lbf/ft ²] | 31.9321023 |
| Metro di colonna d'acqua (mca, m H ₂ O) | 22.4382437 | Libbra a piede quadro (lbf/ft ²) | 31.9321023 |
| Millimetro di mercurio [mmHg, Torr] | 1650.1250111 | Piede colonna d'acqua [ftH ₂ O] | 73.604424 |

<https://www.oppo.it/calcoli/um/pressione.html>



Pressione atmosferica

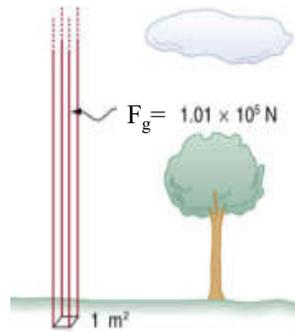


Pressione atmosferica

- La pressione atmosferica è un altro esempio di effetto dovuto alla *massa (peso)* di un fluido; in questo caso è dovuto al peso dell'aria ad una certa altezza.
- La pressione atmosferica varia poco, a larga scala, sulla superficie della Terra (a causa della forma non sferica e della rotazione), tuttavia, il suo valor medio a livello del mare ha il seguente valore:

$$p_0 = 1 \text{ atm} = 1.01 \times 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 101'325 \text{ Pa} = 101 \text{ kPa}$$

- La precedente relazione ci dice che, al livello del mare, una colonna d'aria che eserciti una forza ("prema") su 1 m^2 della superficie terrestre ha un peso di $1.01 \times 10^5 \text{ N}$, equivalente a 1 atm .



Esempio: forza di pressione relativa

- *Un gas alla pressione di 10 atm ($1.013 \times 10^6 \text{ Pa}$) riempie un condotto cilindrico avente superficie laterale S di 0.1 m^2 . Se la pressione esterna è di 1 atm , quale forza risultante agisce sulla parete del condotto?*

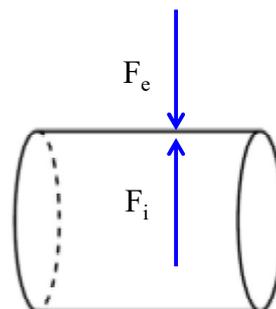
- La forza F_i , che agisce sulla parete interna è determinata dalla pressione del gas contenuto nel condotto:

$$F_i = p_i S = 1.013 \times 10^5 \text{ N}$$

- La forza F_e , esercitata dall'esterno, dovuta alla pressione atmosferica risulta:

$$F_e = p_e S = 1.013 \times 10^4 \text{ N}$$

$$F_i - F_e = (p_i - p_e) S = 9.117 \times 10^4 \text{ N}$$



Esempio: forza di pressione relativa

- La forza esercitata sulla parete è proporzionale alla differenza tra la pressione interna e quella esterna (atmosferica), chiamata *pressione relativa* o *pressione transmurale*.
- Per esempio l'indicatore di una pompa per pneumatici segna la pressione relativa, non la pressione assoluta.
- Quando si parla di pressione in un condotto o in cavità biologiche si sottintende sempre la pressione relativa a quella atmosferica.



Effetti della pressione relativa



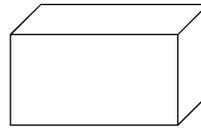
Esempio: peso dell'aria in una stanza

Una stanza ha il pavimento di dimensioni 3,5 m per 4,2 m e altezza di 2,4 m.

(a) Quant'è il peso P dell'aria contenuta nella stanza alla pressione atmosferica?

SOLUZIONE: Due sono le idee chiave: (1) Il peso P dell'aria è pari a mg , dove m è la sua massa. (2) La massa m dell'aria è legata alla sua massa volumica e al volume dall'equazione 15.2. Chiamando V il volume della stanza e ρ la massa volumica dell'aria a 1 bar data dalla tabella 15.1, si ha

$$\begin{aligned} P &= mg = \rho Vg = \\ &= (1.21 \text{ kg/m}^3)(3.5 \text{ m} \cdot 4.2 \text{ m} \cdot 2.4 \text{ m})(9.8 \text{ m/s}^2) = \\ &= 418 \text{ N} \approx 420 \text{ N}. \end{aligned}$$



$$P = mg = \rho Vg$$

Equivalente circa al peso di 110 lattine di birra.

(b) Quale forza esercita l'atmosfera sul pavimento della stanza?

SOLUZIONE: Ido chiave è rendersi conto che l'atmosfera preme contro il pavimento con una forza di intensità uniformemente distribuita su tutta l'area. Quindi genera una pressione data dall'equazione 15.4, da cui si ottiene

$$\begin{aligned} F &= pA = (1.0 \text{ bar}) \left(\frac{10^5 \text{ N/m}^2}{1 \text{ bar}} \right) (3.5 \text{ m} \cdot 4.2 \text{ m}) = \\ &= 1.5 \cdot 10^6 \text{ N}. \end{aligned}$$

$$|F| = pA$$

Questa enorme forza è uguale al peso di una colonna d'aria che incide sul pavimento e si estende in altezza fino alla fine dell'atmosfera.



Equilibrio nei fluidi



Cosa faremo

- Studiamo le leggi più importanti della Meccanica dei fluidi, applicando quelle della Meccanica analizzate finora.
- Le condizioni di equilibrio ed il moto nei fluidi risulta più complicata (dal punto di vista matematico) a causa della deformabilità del mezzo materiale studiato.
- Agiscono, inoltre, ed assumono un ruolo non trascurabile forze di attrito interno ed esterno (forze dissipative e non conservative).



Definizione di fluido

- **DEF:** Un **fluido**, a differenza di un solido, è una sostanza che può scorrere.



- i fluidi prendono la forma dei contenitori nei quali sono confinati.
- Si comportano in questo modo i liquidi poiché non possono sopportare **uno sforzo di taglio** (una forza tangenziale alla loro superficie) ma possono esercitare solo una forza nella direzione perpendicolare alla propria superficie.



Struttura microscopica dei fluidi

- Le proprietà dei corpi [solidi](#) ordinari sono dovute alla forza del legame tra i componenti (atomi o molecole): questi stanno in posizioni fisse attorno alle quali possono al massimo oscillare (difficoltà nel modificarne dimensioni e/o forma).
- Nei [liquidi](#) il legame è meno forte e ciò permette ai componenti di muoversi, restando però praticamente a contatto e, nel complesso, legati (assenza di forma propria).
- Nei [gas](#) le molecole sono in continuo movimento, restando mediamente molto lontane tra loro (la distanza intermolecolare media è molto maggiore delle dimensioni molecolari); durante il moto avvengono urti tra le molecole e tra le molecole e le pareti del contenitore. Le forze intermolecolari decrescono molto rapidamente con la distanza e non sono in grado di tenere le molecole legate. (assenza di forma e di volume proprio).



Equilibrio nei fluidi

- Un fluido in equilibrio assume la forma del recipiente che lo contiene. In particolare, dovendo valere per ogni volumetto di fluido le condizioni generali di equilibrio, valide per un corpo qualsiasi, si deduce quanto segue.
 - a) In un fluido in equilibrio sono nulle le forze tangenti alla superficie limite. Infatti, se così non fosse, gli strati superficiali scorrerebbero sotto l'azione delle componenti tangenziali delle forze e non si avrebbe equilibrio.
 - b) La pressione che si esercita su un elemento di superficie ΔS contenente il punto O interno al fluido, è indipendente dalla giacitura di ΔS . Si può pertanto parlare semplicemente di pressione esistente in un punto P del fluido (*principio di isotropia della pressione*). Infatti, se così non fosse, le particelle di fluido nel punto P sarebbero sottoposte ad una risultante delle forze non nulla.



Principio di Pascal



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

87

Principio di (Blaise) Pascal - 1652

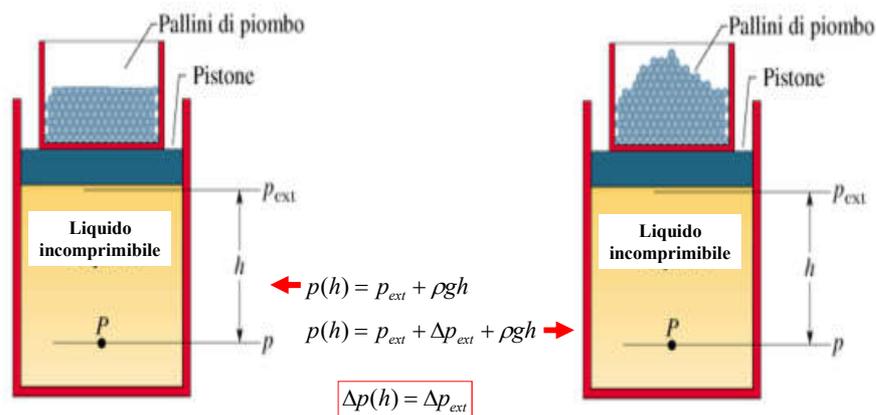


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

88

Principio di (Blaise) Pascal - 1652

- *Un cambiamento di pressione applicato a un fluido confinato viene trasmesso inalterato a ogni porzione di fluido e alle pareti del recipiente che lo contengono.*



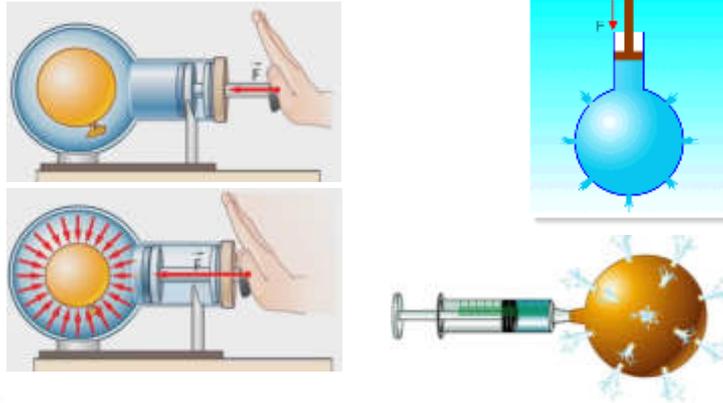
Principio di (Blaise) Pascal - 1652

- Nella realtà i liquidi sono lievemente comprimibili.
- Una variazione di pressione applicata ad una porzione di liquido si propaga con velocità dell'onda sonora; cessata la perturbazione e ristabilito l'equilibrio il Principio di Pascal ritorna ad essere valido .



Principio di (Blaise) Pascal - 1652

- la pressione che si esercita in un punto della superficie limite di un fluido si trasmette inalterata a tutti i punti della superficie limite.



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

92

Principio di (Blaise) Pascal - 1652



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

93

Esperimento di Pascal

- Nell'esperimento, Pascal inserì un tubo verticale lungo 10 m in una botte piena d'acqua. A quel punto Pascal iniziò a versare l'acqua nel tubo verticale fino a riempire il medesimo tubo e osservò un aumento della pressione, che raggiunse una intensità tale da rompere la botte.



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

95

Esperimento di Pascal

- L'aumento di pressione si trasmette a tutto il liquido contenuto nella botte
- Aumenta, di conseguenza, anche la forza esercitata dall'acqua contro le pareti interne della botte ($F=pS$).
- La pressione in un qualsiasi punto interno al fluido (liquido) contenuto nella botte non dipende, quindi, dalla forma del recipiente che lo contiene:
 - un tubo alto ma relativamente stretto può produrre pressioni notevoli senza la necessità di impiego di grossi volumi di fluido (liquido).



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

96

Principio di Pascal: *applicazioni*



Siringa

- La siringa (dal greco σφραγίς) è uno strumento medico formato da un corpo cilindrico cavo, all'interno del quale scorre uno stantuffo a tenuta. Ad un'estremità del corpo della siringa è ricavato un becco sul quale viene innestato un ago, anch'esso cavo, tramite il quale passa il liquido che viene iniettato o aspirato.
- Viene utilizzata per iniettare medicinali e per effettuare prelievi di vari liquidi organici.
- *Un cambiamento di pressione applicato ad un fluido confinato viene trasmesso inalterato a ogni porzione di fluido ed alle pareti del recipiente che lo contiene.*



Cannuccia



Martinetto Idraulico

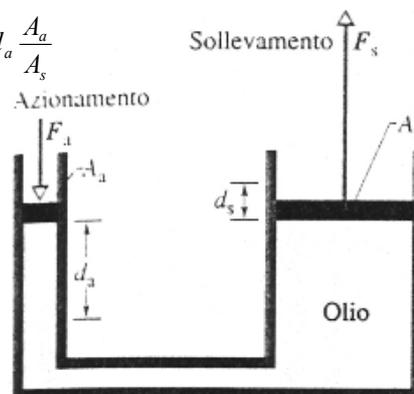
$$\Delta p = \frac{F_a}{A_a} = \frac{F_s}{A_s} \longrightarrow F_s = F_a \frac{A_s}{A_a}$$

- Abbassamento del pistone piccolo di una quantità d_a

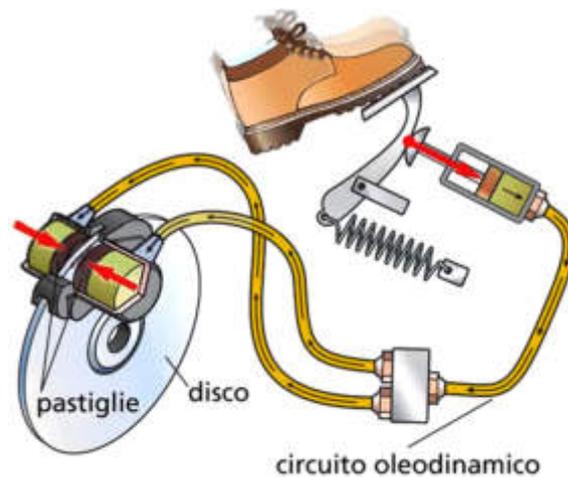
$$V = A_a d_a = A_s d_s = \text{cost} \longrightarrow d_s = d_a \frac{A_a}{A_s}$$

- Lavoro svolto dal pistone

$$L = F_s d_s = \left(F_a \frac{A_s}{A_a} \right) \left(d_a \frac{A_a}{A_s} \right) = F_a d_a$$



Freno a disco



Manovra di Heimlich

- La manovra di Heimlich è una tecnica di primo soccorso per rimuovere un'ostruzione delle vie aeree. Costituisce un'efficace misura per risolvere in modo rapido molti casi di soffocamento.
- In breve, una persona esegue la manovra di Heimlich utilizzando le mani per esercitare una pressione sotto il diaframma. Ciò provoca anche la compressione dei polmoni e a sua volta esercita una pressione su qualsiasi oggetto si trovi nella trachea, con lo scopo di provocarne l'espulsione.
- In sostanza ciò rappresenta un potente e artificiale colpo di tosse. (Ricordiamo che la vittima del soffocamento ha un'ostruzione alle vie aeree, non riuscendo a riempire i polmoni, non ha nemmeno la possibilità di tossire da sola.)



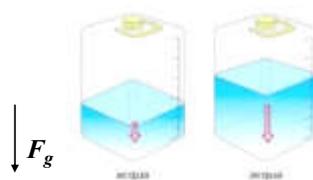
Pressione idrostatica

Legge di Stevino

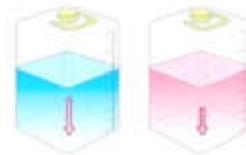


Pressione idrostatica

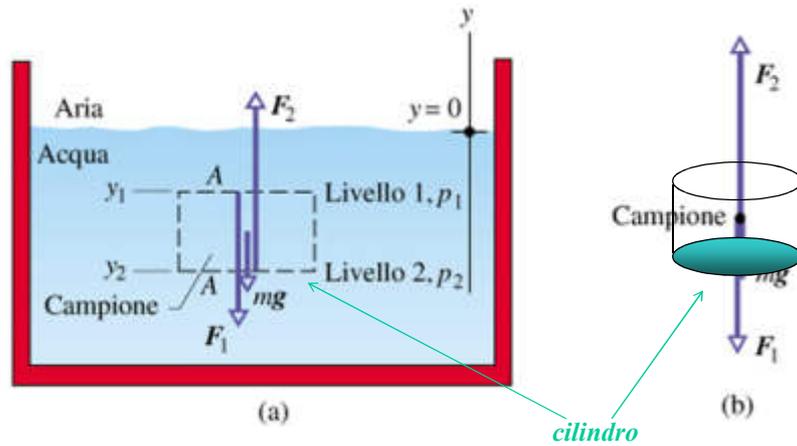
- La pressione (forza su superficie) esercitata sul fondo terrà conto della maggiore quantità d'acqua nel contenitore



- A parità di altezza la pressione (forza su superficie) esercitata sul fondo dei due contenitori terrà conto della densità (e, quindi, peso) del liquido contenuto
- Nel esempio
 - acqua ($\rho=1000 \text{ kg/m}^3$)
 - etanolo ($\rho=790 \text{ kg/m}^3$)



Pressione idrostatica



$$F_2 = F_1 + mg \quad (\text{equilibrio})$$



Pressione idrostatica

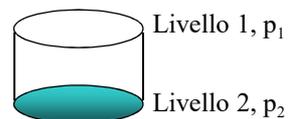
- Partendo da

$$F_2 = F_1 + mg$$

$$F_2 = F_1 + mg \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} F_1 = p_1 A \\ F_2 = p_2 A \\ m = \rho V \\ V = A(y_1 - y_2) \end{array} \right\} \rightarrow p_2 A = p_1 A + \rho A(y_1 - y_2)g$$

- Si arriva a

$$p_2 = p_1 + \rho g(y_1 - y_2)$$



- Valida sia per i liquidi che per l'atmosfera



Esempi di pressione mare/atmosfera

- Sopra la superficie marina

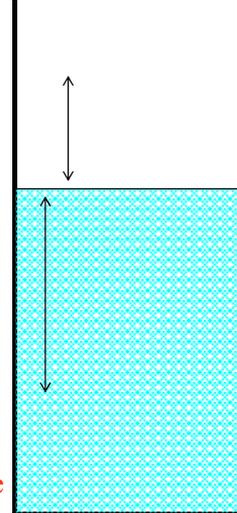
$$p(h) = p_0 - \rho_{aria} gh$$

- Sotto la superficie marina

Legge di Stevino

$$p(h) = p_0 + \rho_{acqua} gh$$

sovrappressione



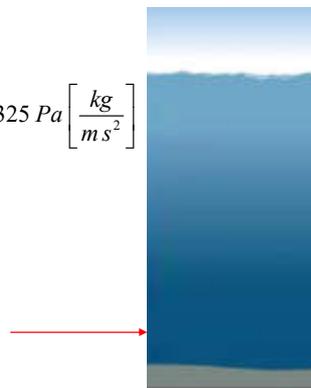
Esempio: mare

- Sapendo che la densità dell'acqua di mare è $\rho_{acqua} = 1030 \text{ kg/m}^3$ qual è il valore della pressione a $h = 500 \text{ metri}$ di profondità?
- Partendo dalla legge idrostatica (tenendo conto che $p_0 = 101'325 \text{ Pa}$)

$$p(h) = p_0 + \rho_{acqua} gh$$

$$p(500) = 101'325 + 1030 \times 9.8 \times 500 = 5'148'325 \text{ Pa} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m s}^2} \right]$$

$$p(500) = 5.15 \times 10^6 \text{ Pa}$$



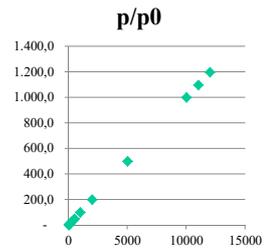
Esempio: mare

$$p(h) = p_0 + \rho_{acqua} gh$$

$$p(500) = 101'325 + 1030 \times 9.8 \times 500 = 5'148'325 \text{ Pa} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m s}^2} \right]$$

$$p(500) = 5.15 \times 10^6 \text{ Pa}$$

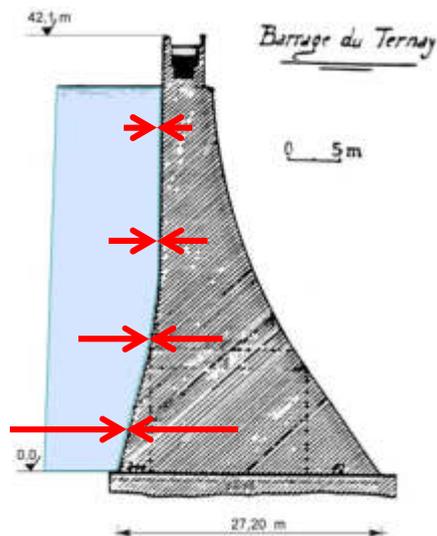
| profondità | p0 | rho | g | p0 + rho g h | p/p0 |
|------------|--------|------|-----|----------------|---------|
| 10 | 101325 | 1030 | 9,8 | 202.265,00 | 2,0 |
| 20 | 101325 | 1030 | 9,8 | 303.205,00 | 3,0 |
| 30 | 101325 | 1030 | 9,8 | 404.145,00 | 4,0 |
| 40 | 101325 | 1030 | 9,8 | 505.085,00 | 5,0 |
| 50 | 101325 | 1030 | 9,8 | 606.025,00 | 6,0 |
| 100 | 101325 | 1030 | 9,8 | 1.110.725,00 | 11,0 |
| 200 | 101325 | 1030 | 9,8 | 2.120.125,00 | 20,9 |
| 300 | 101325 | 1030 | 9,8 | 3.129.525,00 | 30,9 |
| 400 | 101325 | 1030 | 9,8 | 4.138.925,00 | 40,8 |
| 500 | 101325 | 1030 | 9,8 | 5.148.325,00 | 50,8 |
| 1000 | 101325 | 1030 | 9,8 | 10.195.325,00 | 100,6 |
| 2000 | 101325 | 1030 | 9,8 | 20.289.325,00 | 200,2 |
| 5000 | 101325 | 1030 | 9,8 | 50.571.325,00 | 499,1 |
| 10000 | 101325 | 1030 | 9,8 | 101.041.325,00 | 997,2 |
| 11000 | 101325 | 1030 | 9,8 | 111.135.325,00 | 1.096,8 |
| 12000 | 101325 | 1030 | 9,8 | 121.229.325,00 | 1.196,4 |



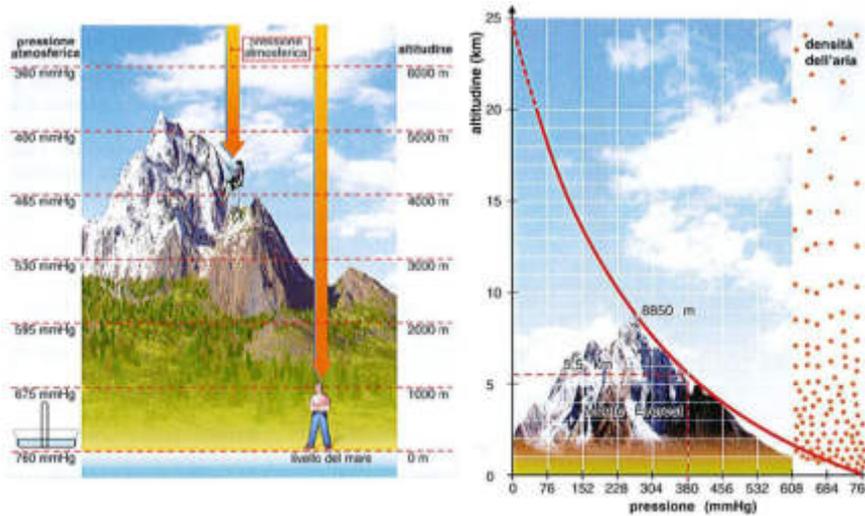
Esempio: diga

$$p(h) = p_0 + \rho_{acqua} gh$$

$$F = p(h)S$$



Variazione della pressione con l'altitudine



Legge di Stevino



Legge di Stevino

- La relazione che abbiamo trovato

$$p_2 = p_1 + \rho g (y_1 - y_2)$$

$$\Delta p = p_2 - p_1 = +\rho g (y_1 - y_2)$$

- mostra che la differenza di pressione statica, fra due punti del liquido a quota diversa, dipende solo dalla differenza di quota e dalla densità del fluido;
- Δp , quindi, non dipende dalla forma del contenitore.

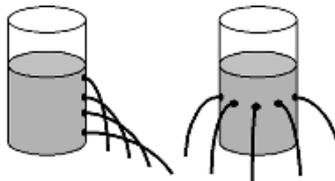
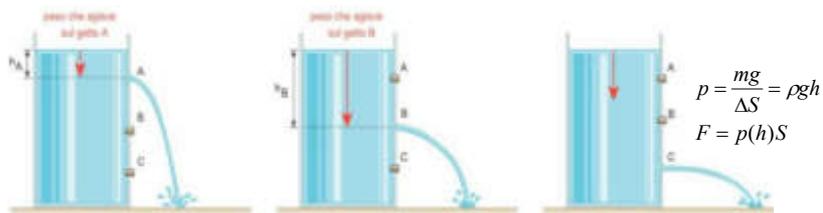
- Per recipienti diversi, contenenti lo stesso liquido alla stessa altezza, la pressione idrostatica sul fondo ha lo stesso valore.



Legge di Stevino

$$p(h) = p_0 + \rho_{acqua} gh$$

$$F = p(h)S$$



Barometro



Barometro a mercurio



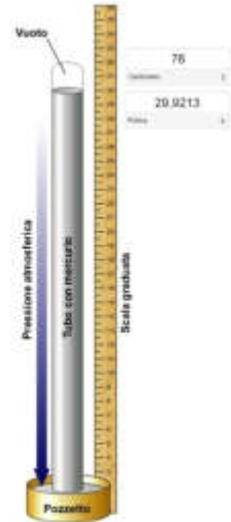
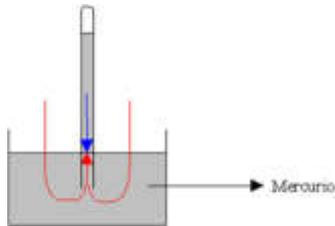
- Evangelista Torricelli mentre inventa il barometro a mercurio, da un'incisione nei libri di Camille Flammarion (1923)



Pressione atmosferica: Misura

$$p_2 = p_1 + \rho g(y_1 - y_2) \rightarrow \begin{cases} y_1 = 0 \\ y_2 = h \\ p_1 = p_0 \\ p_2 = 0 \end{cases} \rightarrow p_0 = \rho g h$$

massa volumica
del mercurio



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

139

Pressione atmosferica: Misura

$$p_2 = p_1 + \rho g(y_1 - y_2) \rightarrow \begin{cases} y_1 = 0 \\ y_2 = h \\ p_1 = p_0 \\ p_2 = 0 \end{cases} \rightarrow p_0 = \rho g h$$

- h non dipende in alcun modo dalla sezione del tubo
- h dipende dal valore dell'accelerazione di gravità g
- h dipende (attraverso ρ) dalla temperatura
- L'altezza della colonna (in **millimetri**) è uguale alla pressione (espressa in **torr**) solo se il barometro si trova in un luogo dove
 - $g = 9.80665 \text{ m/s}^2$
 - la temperatura del mercurio è di $0 \text{ }^\circ\text{C}$.



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

140

Pressione atmosferica: Misura

- Nel caso del mercurio liquido ($\rho = 13'579 \text{ kg/m}^3$), la pressione del fluido eguaglia quella atmosferica con un'altezza della colonna di 760 mm:

$$p_0 [Pa] = \rho_{Hg} \left[\frac{kg}{m^3} \right] g \left[\frac{m}{s^2} \right] h [m]$$
$$h = \frac{101'325 \text{ Pa}}{13'579 \frac{kg}{m^3} \cdot 9.8 \frac{m}{s^2}} = 0.76 \text{ m}$$

- Nel caso dell'acqua ($\rho = 1'000 \text{ kg/m}^3$) la pressione del fluido eguaglierebbe quella atmosferica con un'altezza della colonna ben più alta:

$$p_0 [Pa] = \rho_{H_2O} \left[\frac{kg}{m^3} \right] g \left[\frac{m}{s^2} \right] h [m]$$
$$h = \frac{101'325 \text{ Pa}}{10^3 \frac{kg}{m^3} \cdot 9.8 \frac{m}{s^2}} = 10.34 \text{ m}$$



Pressione atmosferica: Misura

- E se volessi costruire un barometro con olio d'oliva?

| SOSTANZA (a 20 °C) | DENSITA' (in g/cm ³) |
|--------------------|----------------------------------|
| BENZINA | 0,72 |
| OLIO D'OLIVA | 0,92 |
| ACETONE | 0,792 |
| ALCOOL ETILICO | 0,79 |
| ACQUA (a 4 °C) | 1,00 |
| GLICERINA | 1,26 |



Pressione atmosferica

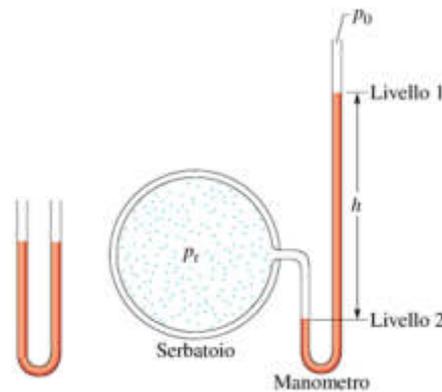


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

143

Manometro a tubo aperto

- Il manometro a tubo aperto misura la **sovrapressione** o pressione relativa p_r di un gas o di un *vapore*.
- Consiste di un tubo a forma di U contenente un liquido: un'estremità del tubo è collegata al recipiente nel quale si vuole misurare la pressione relativa, l'altra è aperta alla libera atmosfera



$$p_2 = p_1 + \rho g(y_1 - y_2) \rightarrow \begin{cases} y_1 = 0 \\ y_2 = -h \\ p_1 = p_0 \\ p_2 = p \end{cases} \rightarrow p_r = p - p_0 = \rho g h$$



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

145

Manometro per pneumatici



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

146

Spinta di Archimede



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

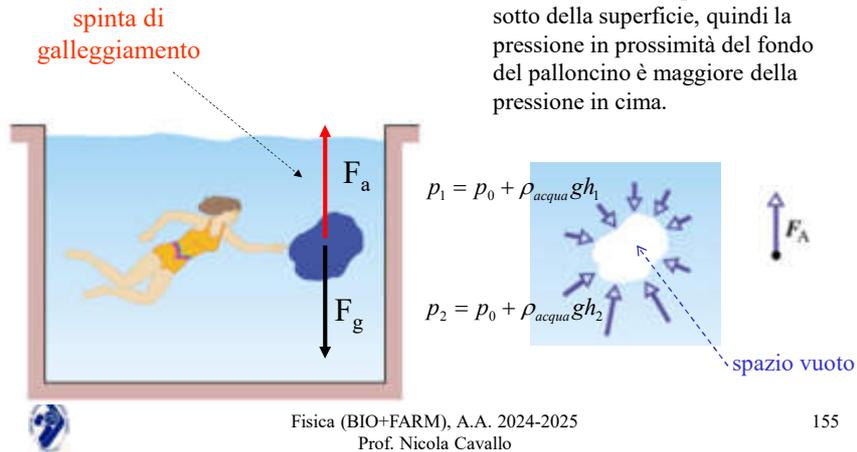
150

Spinta di Archimede

Palloncino
Pieno d'acqua

$$p(h) = p_0 + \rho_{acqua}gh$$

- la pressione aumenta nell'acqua all'aumentare della profondità al di sotto della superficie, quindi la pressione in prossimità del fondo del palloncino è maggiore della pressione in cima.



155

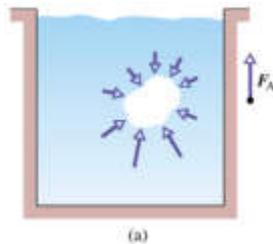
Spinta di Archimede

Palloncino d'acqua

- Equilibrio statico

$$F_A = m_{H_2O}g$$

$$F_A = F_g$$



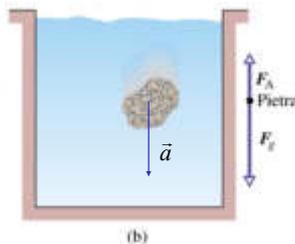
Sasso

- Non in equilibrio statico

$$F_A = m_{H_2O}g$$

$$F_g = Mg$$

$$F_A < F_g$$



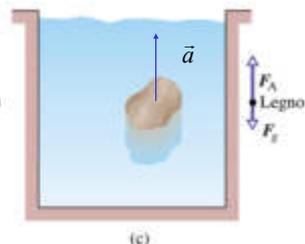
Legno

- Non in equilibrio statico

$$F_A = m_{H_2O}g$$

$$F_g = Mg$$

$$F_A > F_g$$



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

156

Spinta di Archimede

- Enunciazione:
 - *un corpo immerso in un liquido è sottoposto ad un sistema di forze le cui risultante è una forza verticale, diretta dal basso verso l'alto, avente intensità uguale al peso del volume (massa del liquido moltiplicata per g) di liquido spostato.*
- La *spinta di Archimede* è applicata al baricentro del volume di liquido spostato.

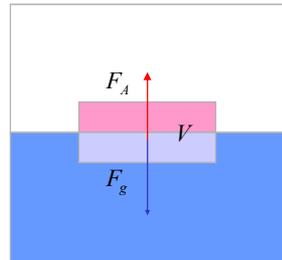


Galleggiamento



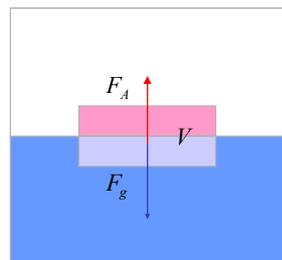
Galleggiamento

- Se immergiamo lentamente un blocco di legno in una vasca, esso penetra nell'acqua perché la forza gravitazionale lo spinge verso il basso.
- Man mano che il blocco sposta sempre più acqua, cresce il modulo della spinta di galleggiamento verso l'alto.
- A un certo punto quest'ultimo arriva a eguagliare l'intensità della forza gravitazionale e la progressiva immersione del blocco si arresta lasciandolo in equilibrio statico: diciamo allora che **galleggia** sull'acqua.



Galleggiamento

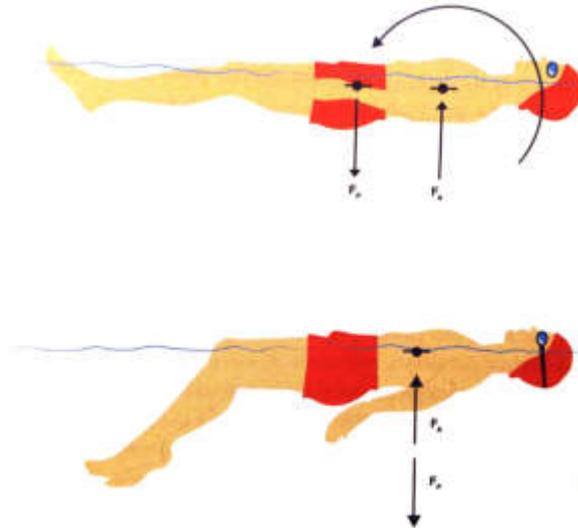
- Quando un corpo galleggia in un fluido il modulo della spinta di galleggiamento eguaglia il modulo della forza gravitazionale.



La spinta si applica al baricentro della massa di fluido spostata e non al baricentro della parte del corpo immersa nel fluido



Galleggiamento del corpo umano



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

161

Spinta di Archimede sul ghiaccio

- Il gigantesco blocco di ghiaccio è in equilibrio tra
 - la **forza di gravità** (“peso”, che agisce su tutto la massa del ghiaccio stesso) e
 - la **spinta di Archimede** (verso l’alto, che agisce sulla massa immersa)

$$F_{NET} = m_{ICE}g - m_{H_2O}g = 0$$

- Da cui

$$\rho_{ICE}V_{ICE} = \rho_{H_2O}V_{immerso}$$

$$\frac{V_{immerso}}{V_{ICE}} = \frac{\rho_{ICE}}{\rho_{H_2O}} = \frac{0.92}{1.025} = 0.898 \text{ (circa il 90\%)}$$

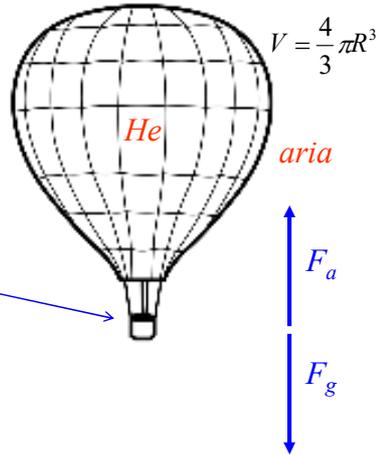


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

162

Aerostato: carico sostenibile

- Pallone aerostatico pieno di elio
 - Raggio $R=12$ metri
 - Massa $m=196$ kg
 - $\rho_{He}=0.16$ kg/m³
 - $\rho_{aria}=1.25$ kg/m³



- Qual è il massimo carico M che può sostenere?



Aerostato: carico sostenibile

- La massa totale è data da:
 - Pallone (trascurabile)
 - Cavi (trascurabile)
 - Cestello
 - Carico
 - Elio

$$M_{TOT} = m + M + m_{He}$$

- L'intensità della forza di gravità deve eguagliare il peso dell'aria spostata

$$(m + M + m_{He})g = m_{aria}g$$

$$M = m_{aria} - m_{He} - m$$

- quindi

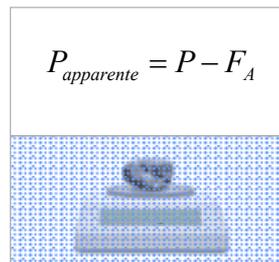
$$M = \rho_{aria}V - \rho_{He}V - m = \left(\frac{4}{3}\pi R^3\right)(\rho_{aria} - \rho_{He}) - m =$$

$$\left(\frac{4}{3}\pi(12m)^3\right)\left(1.25 \frac{kg}{m^3} - 0.16 \frac{kg}{m^3}\right) - 196 kg = 7694 kg$$



Peso apparente in un fluido

- Nel pesare un sasso sott'acqua, il valore misurato sarà minore a causa della spinta di galleggiamento che l'acqua applica al sasso.
- Questo valore è detto “**peso apparente**”



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

174

Esercizi ginnici

- Mostriamo, come esempio di applicazione del Principio di Archimede, alcuni esercizi impiegati per la riabilitazione da postumi di fratture ed interventi chirurgici sfruttando la riduzione del peso dovuta al galleggiamento.

- **Leggerezza**
 - Il galleggiamento permette di annullare in parte o del tutto il peso del corpo, facilitando i movimenti.



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

176

Esercizi ginnici

- Mostriamo, come esempio di applicazione del Principio di Archimede, alcuni esercizi impiegati per la riabilitazione da postumi di fratture ed interventi chirurgici sfruttando la riduzione del peso dovuta al galleggiamento.

- **Resistenza**

- É dovuta alla resistenza (forza resistiva del mezzo) che oppone l'acqua; i movimenti richiedono una attivazione continua della muscolatura.

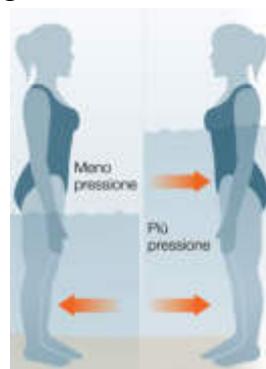


Esercizi ginnici

- Mostriamo, come esempio di applicazione del Principio di Archimede, alcuni esercizi impiegati per la riabilitazione da postumi di fratture ed interventi chirurgici sfruttando la riduzione del peso dovuta al galleggiamento.

- **Pressione**

- É un effetto del peso dell'acqua.
Minima in superficie, aumenta con la profondità.
Camminando in un metro di acqua ad esempio, su fondo sabbioso, il piede riceve una pressione pari ad un decimo di atmosfera.



Vasi comunicanti



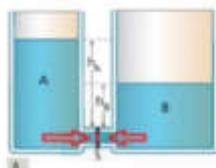
Vasi comunicanti

- Applicando la legge di Stevino,

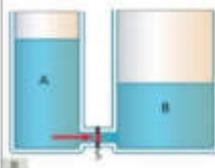
$$p = \frac{mg}{\Delta S} = \rho gh$$

- si vede che in due recipienti comunicanti, un fluido pesante omogeneo si porta sempre allo stesso livello (*Principio dei vasi comunicanti*).

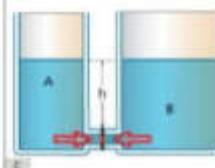
► Se l'altezza h_A del liquido nel recipiente di sinistra è maggiore di h_B , anche la pressione che agisce su S da sinistra è maggiore di quella da destra.



► Quindi la superficie S è spinta verso destra: si ha così un flusso di liquido dal recipiente in cui il liquido ha un'altezza maggiore verso l'altro.



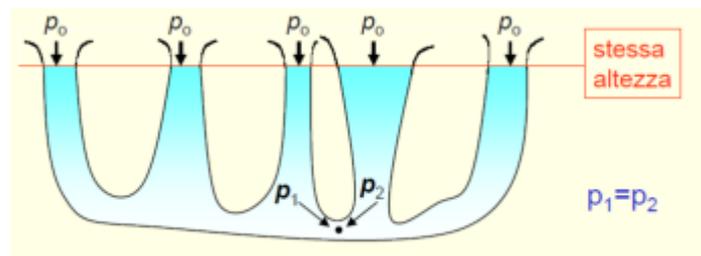
► Soltanto quando la quota del liquido è la stessa nei due recipienti, le due pressioni che agiscono su S sono uguali e il liquido è in equilibrio.



Vasi comunicanti

- Se il liquido è in equilibrio idrostatico, allora $p_1 = p_2$.

$$p = \frac{mg}{\Delta S} = \rho gh \quad \xrightarrow{p_1 = p_2} \quad h_1 = \frac{p_1}{\rho g} = h_2 = \frac{p_2}{\rho g}$$

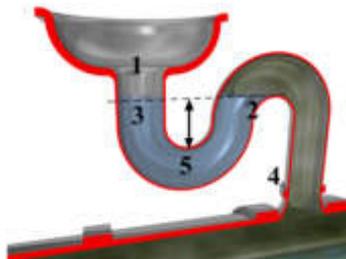


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

181

Sifone

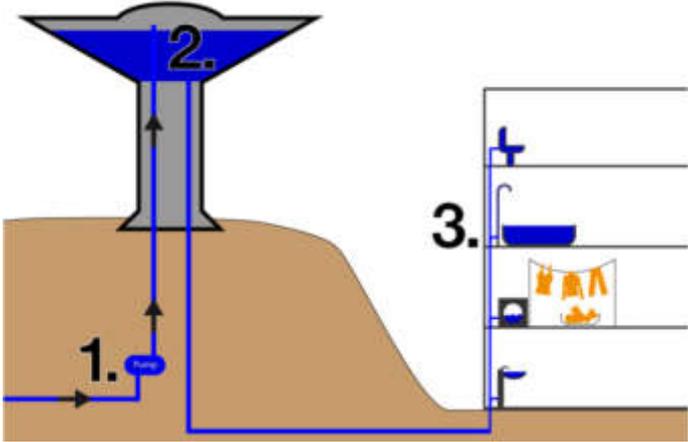
- Il sifone è un elemento idraulico inserito in un condotto, realizzato mediante una tubazione curva a forma di “U”.
- Esso ha la funzione di creare un ostacolo (un “*tappo idraulico*”) al passaggio dei cattivi odori in virtù della presenza di acqua residua nella sua ansa, il cui ristagno va a ostruire la sezione di passaggio dell'odore stesso.



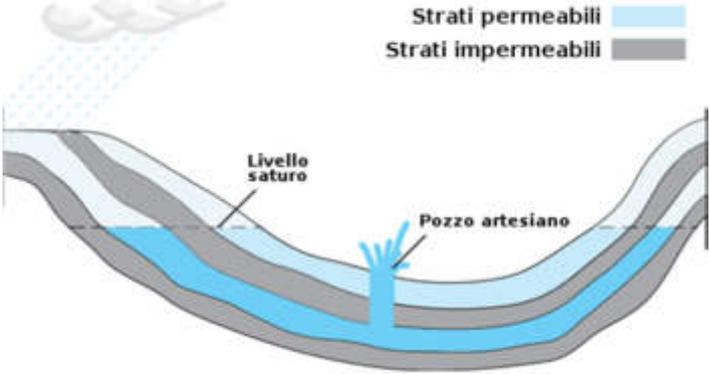
Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

182

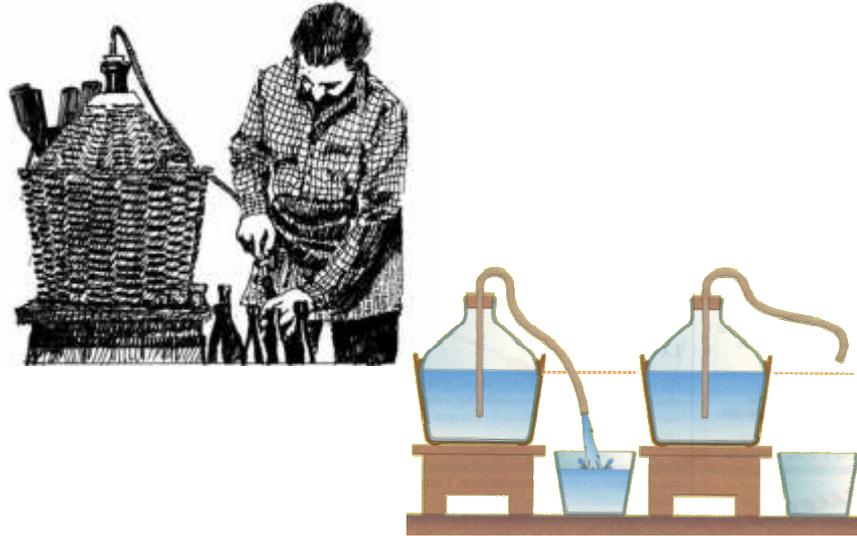
Serbatoio idrico a torre



Pozzo artesiano



Travaso di un liquido

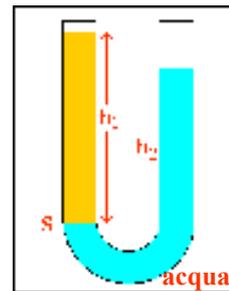


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

185

Quesito

- Si vuole determinare la natura di un fluido per mezzo di un dispositivo come quello mostrato in figura
- Il tubo ad U è riempito con acqua (azzurro) e con il fluido incognito (giallo) e l'altezza delle colonne d'acqua e di fluido viene misurata a partire dalla superficie di separazione tra i due fluidi non miscibili.
- Sapendo che $h_1 = 20$ cm e $h_2 = 18,4$ cm, determinare di che fluido si tratta aiutandosi con le tabelle di densità.



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

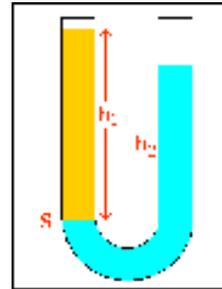
187

Quesito

| Densità di alcuni solidi (a 0°C, 1 atm) | | Densità di alcuni liquidi (a 0°C, 1 atm) | | Densità di alcuni gas (a 0°C, 1 atm) | | |
|--|--------------------|---|--------------------|---|-------------------------------|----------------------|
| Nome | Densità (g/cm³) | Nome | Densità (g/cm³) | Nome | Formula | Densità (g/litro) |
| Alluminio | 2.702 | Acqua | 1.000 | Acetilene | C ₂ H ₂ | 1.173 |
| Argento | 10.490 | Acqua di mare | 1.025 | Aria | | 1.293 |
| Cemento | 2.7-3.0 | Alcool (etilico) | 0.805 | Ammoniaca | NH ₃ | 0.771 |
| Cera | 7.362 | Benzina | 0.682 | Diossido di carbonio | CO ₂ | 1.976 |
| Chiodo | 0.592 | Glicerina | 1.261 | Monossido di carbonio | CO | 1.250 |
| Legno (densità media) | 0.752 | Mercurio | 13.620 | Elio | He | 0.178 |
| Legno di cedro | 0.31-0.49 | Olio d'oliva | 0.922 | Idrogeno | H ₂ | 0.089 |
| Legno d'ebano | 0.982 | Olio di paraffina | 0.802 | Ossigeno | O ₂ | 1.429 |
| Legno d'olmo | 0.54-0.59 | | | Ozono | O ₃ | 2.164 |
| Legno di pino bianco | 0.35-0.50 | | | | | |
| Legno di quercia | 0.54-0.9 | | | | | |
| Nichel | 8.902 | | | | | |
| Oro | 19.300 | | | | | |
| Ottone | 8.4-8.70 | | | | | |
| Oxido | 1.7-2.0 | | | | | |
| Piombo | 11.300 | | | | | |
| Platino | 21.370 | | | | | |
| Rame | 8.762 | | | | | |
| Sughero | 0.25-0.76 | | | | | |
| Tetra (alca media') | 5.592 | | | | | |
| Tungsteno | 19.300 | | | | | |
| Vetro | 2.4-2.8 | | | | | |
| Zinco | 6.902 | | | | | |

Dall'equazione ricavata dal principio dei vasi comunicanti e la legge di Stevino:

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2} \rightarrow \rho_1 = \rho_{H_2O} \frac{h_1}{h_2} = 0,92 \frac{g}{cm^3}$$



Fluidi in movimento



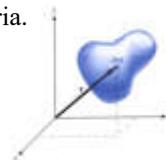
Fluidi ideali in moto

- Il movimento dei *fluidi reali* è complicato e, in alcuni casi, non del tutto conosciuto appieno.
- Discutiamo invece il movimento di un *fluido ideale*, che è più semplice da descrivere matematicamente.
- Caratteristiche di un **fluido ideale**:
 1. Fluido continuo
 2. Flusso stazionario
 3. Moto laminare
 4. Fluido incompressibile
 5. Flusso non viscoso
 6. Flusso irrotazionale



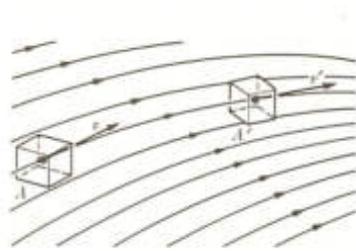
1 - Fluido continuo (meccanica del continuo)

- Un **corpo continuo** è un sistema fisico macroscopico per il quale la dimensione dei fenomeni osservati è tale che questi stessi *fenomeni* non sono influenzati dalla struttura molecolare della materia.
- Per corpo continuo si assume, quindi, che
 - la materia sia distribuita uniformemente ,
 - riempi l'intero spazio (volume) che il corpo occupa,
 - sia possibile definire una funzione densità (*massa volumica*).
- L'ipotesi del continuo considera il fluido come un continuo e non discreto.
- Ciò implica che proprietà intensive del fluido, come densità, temperatura, pressione, velocità, possano essere definite a qualunque scala di lunghezza, anche infinitesima, e quindi varino con continuità da un punto ad un altro.



2 - Fluidi stazionario

- Un flusso stazionario è un flusso (*moto del fluido*) nel quale la velocità del fluido:
 - varia da punto a punto,
 - resta costante nel tempo in ciascun punto.

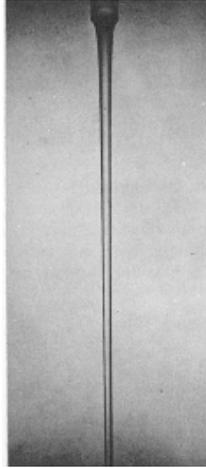


3 - Fluido laminare

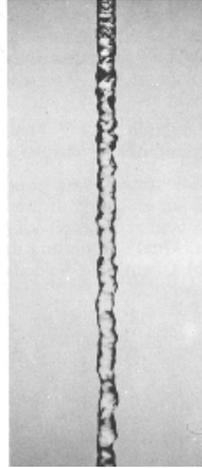
- Nel moto laminare la velocità del fluido in ogni punto fissato non cambia nel tempo, né in direzione, né in intensità.
 - il lento flusso dell'acqua al centro di un tranquillo ruscello è laminare;
 - Non è laminare, invece, il moto delle rapide di un torrente.
- La figura seguente, che mostra il fumo di una sigaretta, illustra la transizione da flusso laminare a flusso non laminare, o turbolento. La velocità delle particelle di fumo aumenta con l'altezza e, a certe velocità critiche, il flusso cambia il suo regime da laminare a turbolento.



Fluidi ideali in moto



Flusso laminare



Flusso turbolento dell'acqua



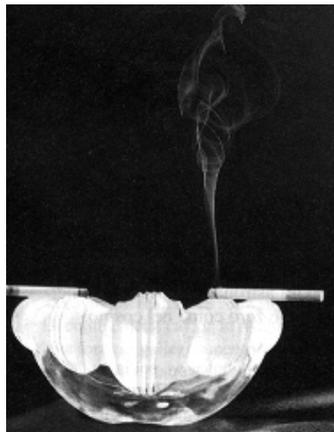
Flusso prima laminare e poi turbolento del fumo della sigaretta



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

199

Fluidi ideali in moto



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

200

Flusso laminare e turbolento



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

202

4 - Fluido incompressibile

- Assumiamo, come già abbiamo fatto con i fluidi a riposo, che il fluido ideale sia incompressibile.
- Ciò significa che la *densità (massa volumica)* del fluido ha un valore costante e uniforme.

$$\rho(x, y, z) = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V}$$



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

203

5 - Fluido non viscoso

- la viscosità di un fluido è la misura di quanto un fluido si oppone allo scorrimento (la viscosità è l'analogo dell'attrito nei solidi).
- Entrambi sono processi nei quali l'energia cinetica di oggetti in movimento viene trasformata in energia termica. (*In assenza di attrito un corpo potrebbe scivolare per inerzia a velocità costante lungo una superficie orizzontale*).
- Un oggetto che si muova in un fluido non viscoso non dovrebbe essere soggetto ad alcuna forza frenante e continuerebbe a muoversi di moto rettilineo uniforme.



Fluidi in movimento: *portata*



Moto dei fluidi: Portata

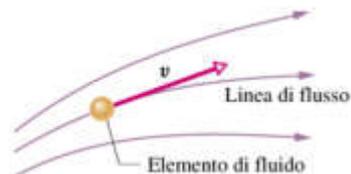
- La descrizione dello stato dinamico di un fluido è molto più complessa di quella del moto di una particella (o di un corpo rigido).
- È necessario conoscere, infatti, la massa, la forza e la velocità in ogni punto del fluido.
- Possiamo descrivere la distribuzione della massa e delle forze nel fluido continuo mediante le funzioni scalari *densità* e *pressione*

$$\begin{aligned} m &\rightarrow \rho = \rho(x, y, z) \\ \vec{F}(x, y, z) &\rightarrow p = p(x, y, z) \end{aligned}$$



Fluidi ideali in moto

- Si può rendere evidente il flusso di un fluido aggiungendogli un tracciante (come ad esempio un colorante oppure particelle di fumo).
- Ciascun elemento di tracciante segue una **linea di flusso**, lo stesso cammino che seguirebbe un minuscolo elemento di fluido.
- La velocità \mathbf{v} è sempre tangente alla traiettoria seguita.
- Le linee di flusso non si intersecano mai.



Moto dei fluidi: Portata

- Per la velocità, in analogia, possiamo impiegare un campo vettoriale di velocità che descrive lo stato di moto del fluido.



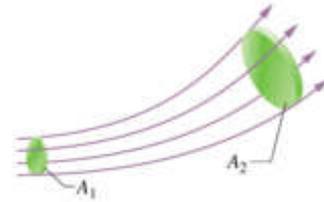
- Analogamente ai campi di forza, il campo di velocità è descritto da linee tangenti in ogni punto alla velocità delle particelle di fluido in quel punto.
- Tali linee sono chiamate *linee di velocità* o *linee di corrente*.



Visualizzazione del flusso



Tubo di flusso



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

210

Moto dei fluidi: Portata

- **Moto stazionario**

- ogni particella di fluido che passi per un dato punto ha la stessa velocità (in modulo e direzione) di tutte le particelle di fluido che l'hanno preceduta e che la seguiranno (*la velocità delle particelle è funzione della posizione, ma non del tempo*)



In questo caso la dinamica dei fluidi è semplificata.



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

212

Moto dei fluidi: Portata

- Sperimentalmente, misurare la velocità delle singole particelle di fluido è impossibile
- Si impiega, quindi una quantità dinamica **portata** Q (o flusso di velocità) in un condotto.
- Q è il volume V di fluido che attraversa una sezione S del condotto nell'intervallo di tempo unitario.

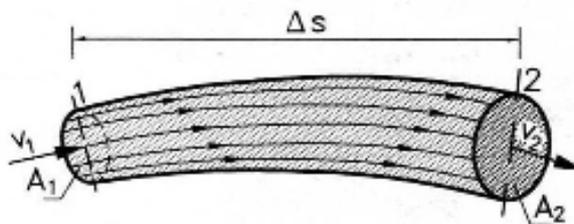
$$Q = \frac{V}{\Delta t}$$

- *Nel S.I. Q è misurata in m^3/s (o anche litro/s e litro/min a seconda delle circostanze)*



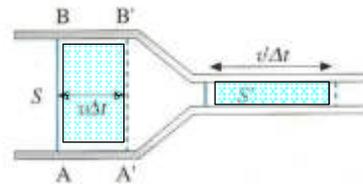
Moto dei fluidi: Portata

- La definizione di portata è generale e può essere applicata a qualsiasi tipo di moto del fluido (*liquido o gassoso*) e a qualsiasi tipo di condotto (*invece di un condotto reale si può pensare ad un condotto immaginario, chiamato **tubo di flusso***).



Relazione tra portata Q e velocità v

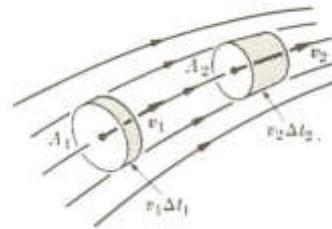
- Consideriamo un condotto di sezione S attraversato da un fluido che si muove con velocità v , uguale in tutti i punti di una stessa sezione.



condotto reale

- La **portata** è data da:

$$Q = \frac{V}{\Delta t} = \frac{Sv\Delta t}{\Delta t} = Sv$$



tubo di flusso



Relazione tra portata Q e velocità v

- Possiamo generalizzare la relazione

$$Q = \frac{V}{\Delta t} = \frac{Sv\Delta t}{\Delta t} = Sv$$

- Se la velocità delle particelle nella sezione S del condotto (*tubo di flusso*) è funzione della posizione (*diversa da punto a punto della sezione*), introduciamo la velocità media delle particelle della sezione, data da

$$v_{media} = \frac{\int_S v(S) dS}{S} \qquad Q = v_{media} S$$

- E generalizzare ulteriormente l'espressione considerando la portata o il flusso di fluido attraverso una superficie qualsiasi (*reale o immaginaria*)

$$Q = \int_S \vec{v} \cdot \hat{n} dS = \int_S v \cos \theta dS$$



Equazione di continuità

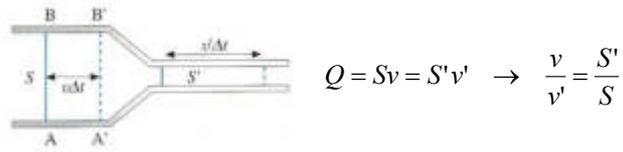
- L'equazione di continuità per il moto dei fluidi deriva direttamente dal Principio di conservazione della massa di fluido.

“La massa associata ad un volume materiale di fluido è costante nel tempo”

- Moto stazionario in un condotto

– Se il fluido è incompressibile (liquido) e le pareti del condotto sono rigide, la portata deve essere uguale in ogni punto del condotto.

- quindi:



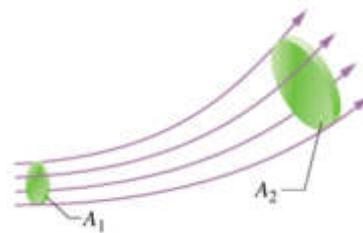
Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

221

Equazione di continuità

$$Sv = \text{cost}$$

- L'equazione si applica non solo a tubi reali, ma anche ai cosiddetti **tubi di flusso**
- DEF: **tubo di flusso** è un tubo immaginario le cui pareti sono costituite da linee di flusso;
- tutto il fluido contenuto in un tubo di flusso rimane entro queste pareti ideali.



- L'equazione

$$Sv = \text{cost}$$

- mostra che, al crescere della sezione, la velocità deve diminuire, come suggerito dall'allargarsi delle linee di flusso sulla destra.

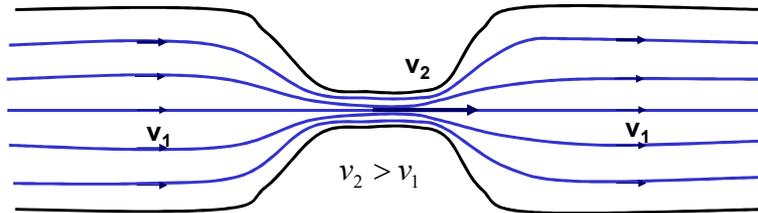


Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

223

Equazione di continuità

- Per un fluido incomprimibile: $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ uniforme
 - Non solo: $m = \rho Sv = \text{cost}$
 - Ma anche: $Sv = \text{cost}$ (la portata $Q = Sv$ è costante)
- Se la portata volumica è costante la velocità è inversamente proporzionale alla sezione.



Esempio

Problema svolto 15.7

La figura 15.18 mostra come il flusso d'acqua che esce da un rubinetto si restringe mentre cade. L'area di sezione A_0 è di 1.2 cm^2 , e A è 0.35 cm^2 . I due livelli sono separati da una distanza verticale $h = 45 \text{ mm}$. Qual è il flusso dell'acqua che esce dal rubinetto?

SOLUZIONE: La idea chiave è semplicemente questa: la portata volumica deve essere identica attraverso entrambe le sezioni. Dall'equazione di



figura 15.18 Problema svolto 15.7. Quando l'acqua esce da un rubinetto la sua velocità aumenta. Giacché la portata deve essere la stessa in tutte le sezioni attraversate, il getto deve restringersi.

continuità (eq. 15.24) si ha dunque

$$A_0 v_0 = A v, \quad (15.26)$$

dove v_0 e v sono le velocità dell'acqua ai corrispondenti livelli. Dall'equazione 2.16 possiamo anche scrivere, poiché l'acqua cade liberamente con l'accelerazione di gravità g ,

$$v^2 = v_0^2 + 2gh. \quad (15.27)$$

Eliminando v tra le equazioni (15.26) e (15.27) e risolvendo rispetto a v_0 si ottiene

$$\begin{aligned} v_0 &= \sqrt{\frac{2ghA^2}{A_0^2 - A^2}} = \\ &= \sqrt{\frac{(2)(9.8 \text{ m/s}^2)(0.045 \text{ m})(0.35 \text{ cm}^2)^2}{(1.2 \text{ cm}^2)^2 - (0.35 \text{ cm}^2)^2}} = \\ &= 0.286 \text{ m/s} = 28.6 \text{ cm/s}. \end{aligned}$$

La portata volumica R_V è quindi, per l'equazione 15.24,

$$R = A_0 v_0 = (1.2 \text{ cm}^2)(28.6 \text{ cm/s}) = 34 \text{ cm}^3/\text{s}.$$



Esempio: cascata

- Calcolo della potenza massima ottenibile (in teoria, trascurando ogni possibile perdita di energia) da un corso d'acqua con una portata di $8 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ con un salto di livello di 15 metri .



- Ricordando che P è uguale al lavoro L ($L=\Delta U$) compiuto in un intervallo di tempo:

$$P = \frac{L}{\Delta T} = \frac{mgh}{\Delta T} = \frac{dV}{\Delta T} gh = dQgh$$

$$P = 11.76 \times 10^6 \text{ Watt}$$



Teorema di Bernoulli

Fluidi "non" viscosi



Fluidi non viscosi: Teorema di Bernoulli

- Caso particolare :
 - fluido non comprimibile e
 - assenza di forze d'attrito (*liquido perfetto*)

Principio di conservazione dell'energia



Teorema di Bernoulli

- Tale teorema può essere applicata, sotto certe condizioni, anche in molti casi in cui il liquido non è perfetto.



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

233

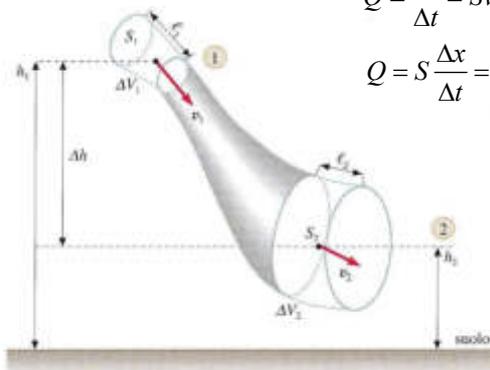
Teorema di Bernoulli

- In condizioni di *moto stazionario* e in un *condotto rigido*, la portata Q è costante (equazione di continuità):

$$Q = \frac{V}{\Delta t} = Sv = \text{cost}$$

$$Q = S \frac{\Delta x}{\Delta t} = S_1 v_1 = S_2 v_2 = \text{cost}$$

$$\frac{S_1 l_1}{\Delta t} = \frac{S_2 l_2}{\Delta t} \rightarrow S_1 l_1 = S_2 l_2$$



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

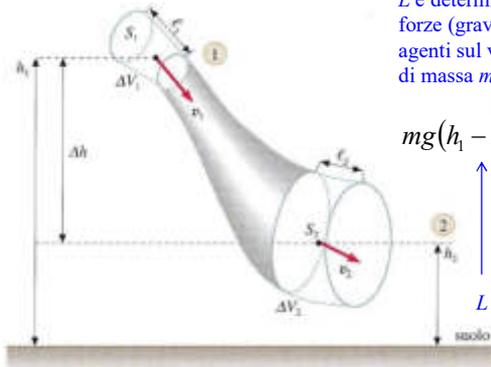
234

Teorema di Bernoulli

- Applicando il teorema dell'energia cinetica:

$$L = \Delta K = K_2 - K_1 = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$$

L è determinato da tutte le forze (gravità e pressione) agenti sul volumetto dV di massa m di liquido



$$mg(h_1 - h_2) + S_1 p_1 l_1 - S_2 p_2 l_2 = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$$

L compiuto dalla forza $p_1 S_1$

L compiuto dalla forza $p_2 S_2$

L compiuto dalla forza di gravità



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

235

Teorema di Bernoulli

- quindi:

$$mg(h_1 - h_2) + S_1 p_1 l_1 - S_2 p_2 l_2 = \frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2$$

$$\rho = \frac{m}{V} \rightarrow m = \rho V \quad S_1 l_1 = S_2 l_2 = V$$

$$\rho V g (h_1 - h_2) + V (p_1 - p_2) = \frac{1}{2} \rho V v_2^2 - \frac{1}{2} \rho V v_1^2$$

$$\rho g (h_1 - h_2) + (p_1 - p_2) = \frac{1}{2} \rho v_2^2 - \frac{1}{2} \rho v_1^2$$

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{1}{2} \frac{v_1^2}{g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{1}{2} \frac{v_2^2}{g}$$



Fisica (BIO+FARM), A.A. 2024-2025
Prof. Nicola Cavallo

237

Teorema di Bernoulli

- La stessa conclusione si ottiene per qualsiasi altra sezione del condotto, da cui il **Teorema di Bernoulli**

$$h + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = cost$$

↑
↑
↑
altezza geometrica
altezza piezometrica
altezza cinetica

- Il teorema afferma che la *somma* delle tre altezze citate è *costante lungo il condotto*



Teorema di Bernoulli

- A volte, nei libri, al posto della relazione

$$h + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = cost$$

↑
↑
↑
altezza geometrica
altezza piezometrica
altezza cinetica

- si preferisce quest'altra, che è espressa in termini di pressione

$$p + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = cost$$

↑
↑
↑
lavoro delle forze di pressione per unità di volume
energia potenziale gravitazionale per unità di volume
energia cinetica per unità di volume



Teorema di Bernoulli

- Controllo dal punto di vista dimensionale:

$$h + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} = cost \quad [m] + \left[\frac{kg}{ms^2} \frac{m^3}{kg} \frac{s^2}{m} \right] + \left[\frac{m^2}{s^2} \frac{s^2}{m} \right] = [m]$$

$$p + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = cost \quad \left[\frac{kg}{ms^2} \right] + \left[\frac{kg}{m^3} \frac{m}{s^2} m \right] + \left[\frac{kg}{m^3} \frac{m^2}{s^2} \right] = \left[\frac{kg}{ms^2} \right]$$



Teorema di Bernoulli

Legge (Teorema) di Torricelli



Teorema di Torricelli

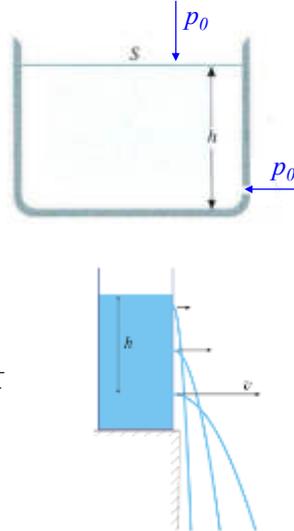
- partendo da

$$h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g}$$

$$\begin{aligned} v_1 &= 0 \\ h_1 &= h \\ p_1 &= p_0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_2 &= v \\ h_2 &= 0 \\ p_2 &= p_0 \end{aligned}$$

$$h + \frac{p_0}{\rho g} = \frac{p_0}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} \rightarrow v = \sqrt{2hg}$$



Teorema di Bernoulli

Legge di Stevino



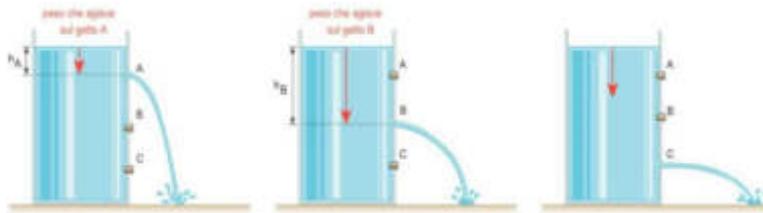
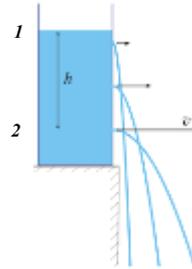
Legge di Stevino

$$p_1 + \rho g y_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \rho g y_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

$(v_1 = v_2 = 0; h = y_2 - y_1)$

$$p_0 = p_2 + \rho g h$$

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



Teorema di Bernoulli

Tubo di Venturi



Caduta di pressione

- Consideriamo un condotto orizzontale.
- Per il Teorema di Bernoulli:

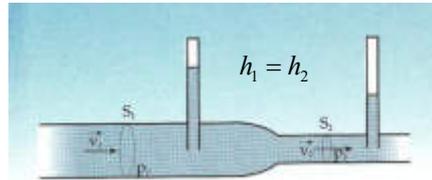
$$h_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{1}{2} \frac{v_1^2}{\rho} = h_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{1}{2} \frac{v_2^2}{\rho}$$

$$\downarrow$$

$$v_1^2 + 2p_1 = v_2^2 + 2p_2$$

$$\downarrow$$

$$Sv = cost \rightarrow \begin{cases} S_1 > S_2 \\ v_1 < v_2 \end{cases} \rightarrow p_1 > p_2$$



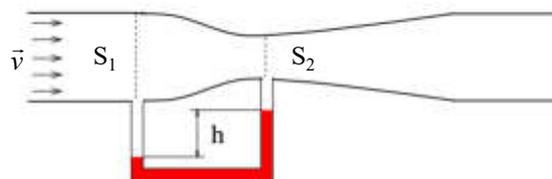
- Generalizzando:

– *Nell'ipotesi di un fluido ideale in regime stazionario in moto in un condotto orizzontale, si ha una caduta di pressione in presenza di una strozzatura.*

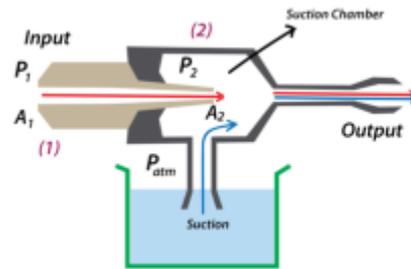
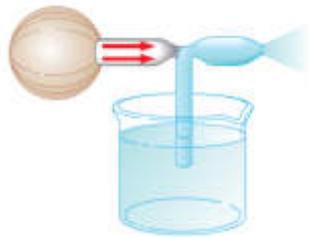


Tubo di Venturi

- Il *venturimetro* ha la funzione di misurare la portata Q di fluido, cioè la quantità di fluido che attraversa una sezione di area S in un intervallo di tempo.
- Tuttavia, viene utilizzato maggiormente per generare differenze di pressioni utili, all'interno di un condotto.



Tubo di Venturi: applicazioni



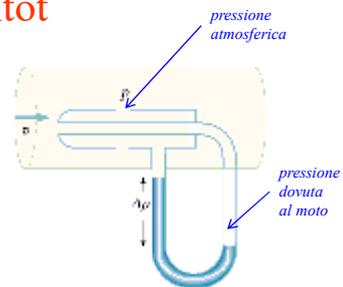
Teorema di Bernoulli

Tubo di Pitot



Tubo di Pitot

- Il **Tubo di Pitot** è uno strumento utilizzato per misurare la velocità macroscopica di un fluido (tipicamente un gas).
- Fu inventato nel 1732 dallo scienziato francese *Henri Pitot*.



$$p_0 + \cancel{\rho gh} + \frac{1}{2}\cancel{\rho}v^2 = p + \cancel{\rho gh} + \frac{1}{2}\rho v^2$$

$$p_0 = p + \frac{1}{2}\rho v^2$$

$$v = \sqrt{\frac{2(p_0 - p)}{\rho}}$$

