



# Sistemi da vuoto

- Introduzione
- Applicazioni del vuoto
- Un pò di storia
- Gradi di vuoto
- Generalità sui sistemi da vuoto
- Effetti di superficie
- Evoluzione della pressione nel tempo
- Velocità di pompaggio efficace
- Velocità di pompaggio effettiva di una pompa
- Pompe da vuoto
- Pompa rotativa e pompa a diffusione
- Misura della pressione negli impianti da vuoto
- Generalità sui vacuometri
- Barometro di Torricelli
- Vacuometro di McLeod
- Vacuometri piezoresistivi

# Il vuoto: introduzione

---

- Nel linguaggio scientifico questo termine viene usato con due accezioni: una, più astratta, per cui esso indica lo spazio totalmente privo di materia, ed una, preminente nell'uso tecnico, per cui si chiama vuota ogni regione di spazio (ovviamente libera da materiali allo stato solido o liquido) occupata da aeriformi (gas o vapori) la cui pressione totale sia sostanzialmente inferiore a quella atmosferica.
- Il vuoto è indispensabile per molte applicazioni ed è quindi necessario produrlo in ambienti o recipienti adatti attraverso opportuni dispositivi.
- Negli ultimi decenni grandissimi progressi sono stati compiuti nell'ottenere e nel misurare vuoti sempre più spinti. Oggi, si raggiungono pressioni anche inferiori a  $10^{-10}$  Pa in ambienti quali parti di macchine acceleratrici di particelle.
- Gli obiettivi scientifici più ambiziosi richiedono un costante miglioramento delle tecniche di vuoto e portano a grandiose realizzazioni, impensabili sino a qualche anno fa. Attualmente i più grandi impianti di alto vuoto al mondo sono senza dubbio gli interferometri per la rivelazione delle onde Gravitazionali installati in Italia e negli USA. Si tratta di tubi da vuoto di diametro superiore al metro e di lunghezza di alcuni chilometri a pressioni dell'ordine di  $10^{-6}$  Pa.
- Molti esperimenti che studiano le proprietà microscopiche della materia (ad esempio nei laboratori di luce di sincrotrone) richiedono ambienti in alto o ultra alto vuoto per evitare che le collisioni di sonde di analisi o particelle emesse dalla materia interagiscano con l'atmosfera circostante o che le superfici in esame si contaminino.
- La forte spinta migliorativa è derivata non solo da esigenze puramente scientifiche ma anche da precise richieste di alcuni settori della tecnologia. La tecnica di produzione del vuoto si applica quindi ad un grande numero di impianti con scopi e necessità di livello di vuoto anche molto diversi come appare, a titolo d'esempio, nella tabella seguente.

# Applicazioni del vuoto

Applicazioni	Pressione (Pa)
Simulazione spaziale	$10^5 \div 10^{-4}$
Crescita di film sottili	$10^{-1} \div 10^{-8}$
Tubi elettronici (cinescopi, valvole termoioniche, etc.)	$10^{-1} \div 10^{-6}$
Metallurgia (fusioni e leghe sotto vuoto, metallizzazione, ecc.)	$10^5 \div 10^{-1}$
Macchine acceleratrici di particelle	$10^{-4} \div 10^{-11}$
Fisica dei plasmi e macchine per fusione nucleare	$10^{-5} \div 10^{-8}$
Studi di proprietà microscopiche di superfici	$10^{-4} \div 10^{-9}$
Liofilizzazione	$10^1 \div 10^{-1}$
Isolamento termico	$10^{-1} \div 10^{-3}$

- Le ragioni per cui si desidera produrre il vuoto sono legate alla natura dell'applicazione considerata e quindi possono essere molteplici sia di natura scientifica (A), sia di natura tecnologica (B),

A1) In un esperimento in cui studiamo particelle che si muovono libere (in un acceleratore) o che vengono utilizzate come sonda per studiare la materia dobbiamo minimizzare la probabilità di interazione con l'atmosfera circostante. Generare il vuoto alto o ultra-alto permette di minimizzare la probabilità d'urto del gas ( il libero cammino medio delle molecole aumenta tanto più il gas è rarefatto) e minimizzare la probabilità d'interazione con le particelle di cui ci interessa seguire l'evoluzione

A2) In molti esperimenti della materia condensata si studiano superfici e in generale pochi strati atomici della materia. Per ottenere delle informazioni sulle proprietà delle superfici è importante che la composizione della superficie rimanga la stessa durante l'esperimento quindi occorre minimizzare il numero di molecole nello spazio circostante che possano interagire e reagire. Per ridurre la frequenza di collisione di molecole e atomi che compongono l'atmosfera con le superfici e per allungare i tempi di contaminazione delle superfici stesse dobbiamo inserire i campioni in un sistema di ultra alto vuoto, in cui la pressione sia ridotta al di sotto di  $10^{-6}$  Pa

# Applicazioni del vuoto

---

- A3) Nello studio di gas può essere importante controllare la pressione del gas in esame. Può essere ad esempio necessario ridurre la concentrazione di uno o più gas particolari al di sotto di un livello critico (per es. riduzioni di O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O e idrocarburi in tubi elettronici o in sistemi in cui si studia la scarica nei gas).
  
- A4) Simulare particolari situazioni fisiche come quelle che si verificano nello spazio planetario (camere di simulazione spaziale per prove su satelliti e navi spaziali).
  
- B1) Favorire l'isolamento termico creando delle intercapedini in cui è viene creato il vuoto per minimizzare la propagazione del calore per conduzione e convezione (per es. nei dewars, i contenitori dei liquidi freddi).
  
- B2) Per rallentare i processi di decomposizione organica dovuti ad agenti aerobici ( sistemi di imballaggio del materiale organico sotto vuoto)
  
- B3) Impedire processi chimico-fisici causati dall'azione dei gas atmosferici (per es. durante la fusione di particolari metalli reattivi, come il Ti; in tubi termoionici per permettere un elevato cammino medio degli elettroni, evitare scariche nel gas e reazioni chimiche sul filamento caldo).
  
- B4) Eliminare i gas disciolti contenuti in un dato materiale (per es. degasaggio di oli e liofilizzazione),

# Un pò di storia

---

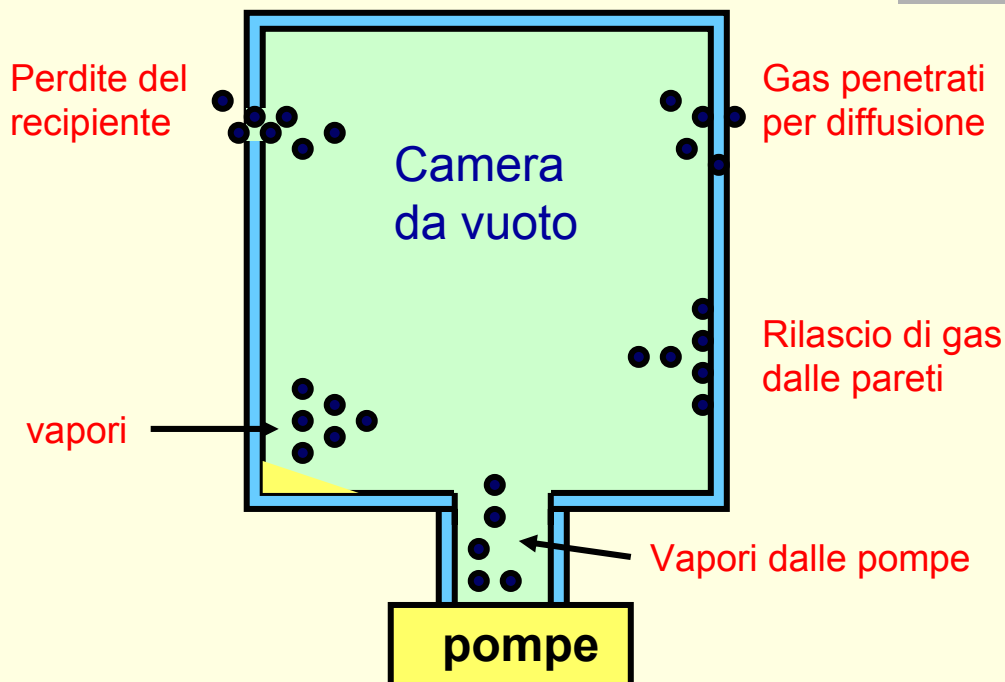
- Il concetto di vuoto fu introdotto per la prima volta nella filosofia naturale da Democrito nella sua teoria atomista della materia. Questo concetto fu duramente contestato da Aristotele, e fino al 1600 prevalse l'idea dell' "horror vacui". Cartesio fu uno degli ultimi filosofi/scienziati a negare con molta fermezza l'esistenza del vuoto in base a principi filosofici.
- Galileo riportò la questione sul piano sperimentale studiando il vuoto parziale prodotto con una pompa aspirante, e ponendo le basi per gli studi futuri di Berti, Magni, Magiotti e Torricelli.
- Un fenomeno inspiegabile dell'epoca era legato alla massima altezza, di circa 9 metri, alla quale si riusciva ad aspirare una colonna d'acqua (Gasparo Berti). Torricelli nel 1644 sostituì l'acqua con il mercurio, riuscendo a mettere in relazione l'altezza della colonna di mercurio con la pressione atmosferica. Era nato il primo barometro a mercurio.
- Von Guericke nel 1654 costruì la prima pompa da vuoto e realizzò la sua spettacolare dimostrazione dell'esistenza del vuoto. Prese due semisfere metalliche (sfere di Magdeburgo), di raggio  $R$ , le fece combaciare ed estrasse l'aria dall'interno. Fece quindi attaccare 4 coppie di cavalli a ciascuna semisfera invitando i presenti a far separare le due semisfere. Nell'incredulità dei presenti i cavalli non riuscirono nel loro intento. La forza necessaria richiesta è pari a  $\pi R^2 \Delta p$ , quindi anche per un vuoto grossolano pari ad un decimo di atmosfera, si può calcolare l'enorme forza che avrebbero dovuto applicare i cavalli per avere un esito positivo nel loro sforzo.
- Facendo un salto di 200 anni, nel 1850 McLeod inventò il suo dispositivo per misurare pressioni molto basse: il vacuometro di McLeod.
- Nel 1905 Gaede inventò la prima pompa rotativa a mercurio, che poi migliorò via via nel corso degli anni, inventando anche nuovi tipi di pompa, quali la pompa molecolare.

# Gradi di vuoto

Denominazione	Pressione (mmHg= Torr)	Densità di particelle (molecole/cm <sup>3</sup> )	Cammino libero medio (cm)	Pressione (Pa)
Pressione atmosferica	760	$2.5 \cdot 10^{19}$	$6.6 \cdot 10^{-6}$	101325
Vuoto grossolano	1	$3.2 \cdot 10^{16}$	$5 \cdot 10^{-3}$	$\sim 1.3 \cdot 10^2$
Medio vuoto	$10^{-3}$	$3.2 \cdot 10^{13}$	5	$\sim 1.3 \cdot 10^{-1}$
Alto vuoto	$10^{-6}$	$3.2 \cdot 10^{10}$	$5 \cdot 10^3$	$\sim 1.3 \cdot 10^{-4}$
Altissimo vuoto	$10^{-8}$	$3.2 \cdot 10^8$	$5 \cdot 10^5$	$\sim 1.3 \cdot 10^{-6}$
Ultra vuoto	$10^{-13}$	$3.2 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^{10}$	$\sim 1.3 \cdot 10^{-11}$

- Si indica con il termine “grado di vuoto” la rarefazione ottenuta nel recipiente da evacuare, che viene misurata dalla pressione assoluta dei gas residui.
- Nella tabella viene riportata la nomenclatura associata ai vari gradi di vuoto insieme ai limiti di ogni categoria, ad esempio il medio vuoto va dalla pressione di 1 Torr fino a  $10^{-3}$  Torr e così via. Ovviamente questa nomenclatura ed i limiti associati non sono rigorosi e variano a secondo dei testi che si consultano. Questa classificazione serve solo a dare un’idea di massima.
- Nella terza colonna è riportata la densità delle molecole assumendo una temperatura di 300 K. Come si può notare anche per pressioni molto basse si ha sempre un numero molto alto di molecole per cm<sup>3</sup>.
- Nella quarta colonna è riportato il cammino libero medio assumendo una temperatura di 300 K ed un diametro molecolare medio per l’aria di  $\sim 3.7\text{Å}$ . Come si può notare il regime molecolare si stabilisce per pressioni intorno al Pascal.

# Generalità sui sistemi da vuoto



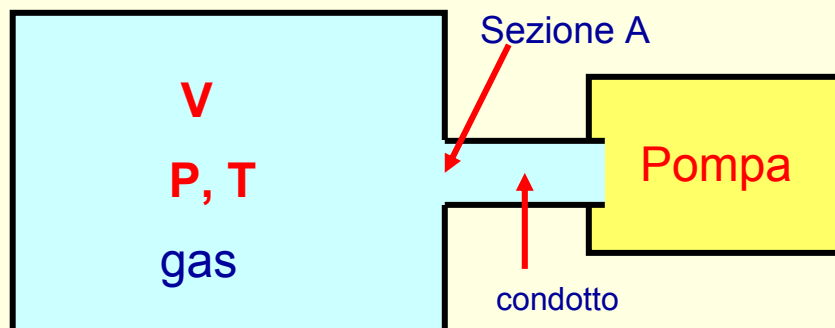
- Un sistema da vuoto è costituito in generale da quattro tipi di componenti: una camera a vuoto, un impianto di pompaggio, un apparato di misura del vuoto, un complesso di giunti, valvole, condotti e trappole che richiede l'uso di particolari guarnizioni e materiali per vuoto.
- Si distinguono i sistemi sottoposti a pompaggio continuo da quelli che vengono sigillati dopo l'evacuazione; i primi si chiamano a vuoto dinamico mentre i secondi si indicano a vuoto statico.
- In ogni sistema a vuoto si ha una serie di processi che comportano il rilascio di un certo flusso di gas all'interno della camera a vuoto e questi gas devono venire in qualche modo eliminati se si vuole che il vuoto si mantenga al grado iniziale.
- Le principali sorgenti di flusso di gas sono indicate schematicamente nella figura. Esse sono dovute a perdite del recipiente, gas penetrati per diffusione, rilascio di gas dalle pareti, vapori, vapori dalle pompe.
- Per eliminarli o ridurne gli effetti occorre adottare particolari precauzioni, quali ad esempio non toccare a mani nude il contenuto o le pareti della camera a vuoto.

# Effetti di superficie: adsorbimento, condensazione, assorbimento e rilascio

- La quantità di gas rilasciata dalle pareti di una camera da vuoto e/o dai condotti, può determinare la pressione finale di lavoro a partire da condizioni di vuoto medio. Ad esempio, supponiamo di avere una camera mantenuta in vuoto dinamico a  $10^{-4}$  Pa da una pompa: questo significa avere una densità di molecole allo stato gassoso a di  $3 \cdot 10^{16}$  molecole/m<sup>3</sup>. Un monostrato di molecole, depositato sulla parete della camera, contiene circa  $5 \cdot 10^{18}$  molecole/m<sup>2</sup>. In genere il rapporto superficie/volume di un impianto da vuoto può variare da  $10^{-3}$  m<sup>-1</sup> ad  $1$  m<sup>-1</sup>; se supponiamo di avere un rapporto unitario, possiamo notare come il distacco di un centesimo delle molecole distribuite su  $1$  m<sup>2</sup> di superficie avvenuto nell'unità di tempo, può portare al raddoppio della pressione nella camera o meglio ad un rilascio pari al doppio della portata della pompa.
- Tra tutte le molecole che urtano la superficie di una camera da vuoto solo una certa frazione vi aderisce concorrendo a formare un monostrato di ricopertura. Diremo allora che le molecole che vi aderiscono sono **adsorbite**. In generale non tutta la superficie è soggetta all'**adsorbimento**. Nel caso di adsorbimento le molecole del gas sono intrappolate in una buca di potenziale prodotta da molecole di natura diversa (quelle della parete).
- Se poi le molecole del gas si legano debolmente con le molecole della stessa specie già adsorbite, allora concorrono a creare altri strati depositati sulla parete: parleremo in tal caso di fenomeno di **condensazione**. In pratica si ha un cambiamento di fase dallo stato gassoso a quello liquido o solido ed ovviamente in tale processo gioca un ruolo fondamentale la temperatura della superficie.
- Infine, se le molecole del gas diffondono all'interno della matrice cristallina della parete o penetrano nelle sue porosità a tal punto da essere occluse, allora parleremo di fenomeno di **assorbimento** (o più semplicemente *assorbimento*). La quantità di gas che può essere assorbita da una parete dipende dal coefficiente di solubilità e dalla costante di diffusione del gas nel solido. In realtà pochi gas diffondono significativamente nei materiali solidi, fatta eccezione per l'idrogeno e l'elio.



# Evoluzione della pressione nel tempo in un recipiente ideale



- Consideriamo un recipiente ideale a pareti rigide di volume  $V$  contenente  $N$  molecole di gas alla temperatura  $T$  ed alla pressione  $P$
- Il recipiente è collegato ad una pompa da vuoto tramite un condotto di sezione  $A$  ( $A$  è la sezione del foro che collega il recipiente al condotto).
- All'istante  $t$  nel recipiente ci sono  $N$  molecole alla pressione  $P$
- All'istante  $t+dt$  nel recipiente ci sono  $N'$  molecole alla pressione  $P'$
- Dall'equazione dei gas perfetti si ha:

$$PV = NKT$$

$$P'V = N'KT$$

$V$  è lo stesso in entrambi i casi perché il volume occupato dal gas non cambia. Inoltre anche la temperatura del gas rimane costante.

- Sottraendo le due equazioni si ha:

$$(P'-P)V = (N'-N)KT \Rightarrow -dP \cdot V = -dN \cdot KT \quad (\text{Se stiamo aspirando il gas la pressione diminuisce})$$

- Il numero di molecole  $N_A$  che attraversa il condotto nell'intervallo di tempo  $dt$  è esattamente uguale alla diminuzione di molecole all'interno del recipiente, cambiato di segno.

$$dN_A = -dN$$

$$\Rightarrow -dP \cdot V = dN_A \cdot KT \Rightarrow -\frac{dP}{dt} \cdot V = \frac{dN_A}{dt} \cdot KT$$

## ... continua ...

- Possiamo introdurre ora la portata  $Q_A$  attraverso il condotto definita come:

$$Q_A = \frac{dN_A}{dt} \cdot KT$$

- quindi l'equazione diventa:  $-V \frac{dP}{dt} = Q_A$

- Ora possiamo introdurre la portata volumetrica  $\Sigma$  definita come  $\Sigma = dV/dt$ , dove  $dV$  è il volume di gas che attraversa la sezione A del condotto nell'intervallo di tempo  $dt$ .

- Noi sappiamo che le molecole  $dN_A$  che attraversano la sezione A, si trovano alla pressione  $P$  ed alla temperatura  $T$ . Possiamo quindi risalire al volume  $dV$  da loro occupato nel recipiente, tramite la legge dei gas perfetti:

$$dV = \frac{1}{P} dN_A \cdot KT \Rightarrow \frac{dV}{dt} = \frac{KT}{P} \frac{dN_A}{dt} \Rightarrow P \cdot \Sigma = Q_A$$

- Quindi l'equazione che regola l'andamento della pressione in un recipiente privo di perdite diventa:

$$-V \frac{dP}{dt} = P \cdot \Sigma$$

- dove ricordiamo che  $P$  è la pressione all'interno del recipiente e  $\Sigma$  è la portata volumetrica giusto all'uscita del recipiente.
- In questo contesto  $\Sigma$  viene interpretata, come vedremo più avanti, come la velocità di aspirazione efficace della pompa. Per mettere in relazione la velocità di aspirazione efficace della pompa all'ingresso del recipiente con la velocità di aspirazione della pompa all'uscita della pompa stessa, dovremo ricorrere alla legge di Ohm della fluidodinamica che tenga conto della conduttanza dei vari condotti, valvole ed altro, che connettono la pompa al recipiente in cui occorre fare il vuoto.

# Andamento della pressione in funzione del tempo

- Abbiamo ricavato l'equazione che regola l'andamento della pressione in un recipiente privo di perdite:

$$-V \frac{dP}{dt} = P \cdot \Sigma \quad \Rightarrow \quad -\frac{V}{P} dP = \Sigma dt$$

- Ricordiamo che  $\Sigma$  è la velocità di pompaggio efficace della pompa. Come vedremo più avanti, essa è funzione della pressione presente nel recipiente, e quindi è funzione del tempo, dato che nelle nostre ipotesi il recipiente viene svuotato dal gas in esso contenuto.
- Se tuttavia scegliamo un intervallo di tempo  $(t - t_0)$  sufficientemente breve in modo da poter considerare  $\Sigma$  costante, possiamo integrare l'equazione differenziale:

$$\int_{P_0}^P \frac{dP'}{P'} = -\frac{1}{V} \int_{t_0}^t \Sigma dt' = -\frac{\Sigma}{V} \int_{t_0}^t dt' \quad (P_0 \text{ è la pressione per } t=t_0)$$
$$\Rightarrow \ln \frac{P}{P_0} = -\frac{\Sigma}{V} (t-t_0)$$

- Introduciamo la costante di tempo caratteristica del fenomeno:

$$\tau = \frac{V}{\Sigma}$$

- In questo modo l'andamento della pressione  $P$  nel recipiente in funzione del tempo è uguale a (per semplicità assumiamo  $t_0 = 0$ ):

$$P = P_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

- Come si vede si ottiene un esponenziale decrescente. Da notare che la costante di tempo  $\tau$  cresce linearmente con il volume  $V$  da svuotare, mentre  $\Sigma$  dipende dalla pompa da vuoto e dai condotti, ma non dal volume  $V$ . Quindi misurando  $\tau$  per diversi volumi  $V$  si può ricavare  $\Sigma$ .

# Evoluzione della pressione nel tempo in un recipiente con perdite

- Supponiamo ora che il recipiente non sia ideale e presenti delle perdite verso l'esterno oppure abbia dei fenomeni di degassaggio o di altro tipo, che fanno sì che all'interno del recipiente vengano rifornite un numero  $dN_F$  di molecole nell'intervallo di tempo  $dt$ .
- Questo equivale a considerare una portata  $Q_F$  di molecole che ha verso opposto al flusso di molecole aspirate  $Q_A$ , in quanto questo flusso va dentro il contenitore e non fuori.
- L'equazione si può quindi modificare nel modo seguente:

$$-V \frac{dP}{dt} = P \cdot \Sigma - Q_F$$

- ovvero l'equazione che regola la pressione in funzione del tempo in un recipiente con perdite  $Q_F$  si scrive:

$$P \cdot \Sigma = -V \frac{dP}{dt} + Q_F$$

- Se siamo in una situazione di regime stazionario in cui tante molecole vengono aspirate dalla pompa e tante ne vengono immesse nel recipiente dalle varie perdite, la pressione  $P$  non varia più nel tempo, e si arriva all'equazione:

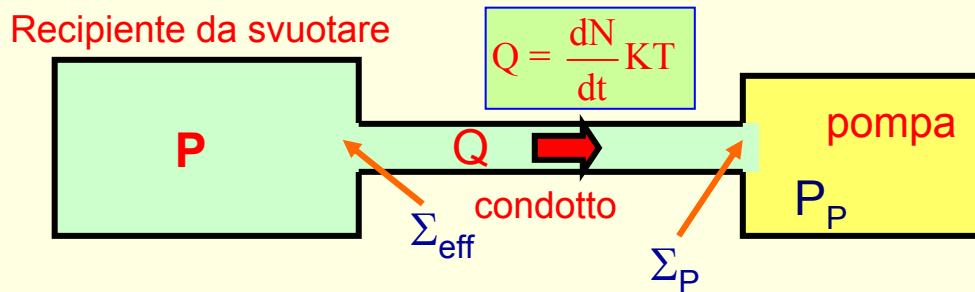
$$P_{lim} \cdot \Sigma = Q_F$$

- dalla quale si può ricavare la pressione limite  $P_{lim}$  che si può raggiungere all'interno del recipiente:

$$P_{lim} = \frac{Q_F}{\Sigma}$$

- la quale, come si vede, dipende dalla velocità di pompaggio efficace che si riuscirà ad avere all'imbocco del recipiente nel quale si vuole fare il vuoto.

# Velocità di aspirazione dopo una conduttanza C



- Consideriamo un recipiente da svuotare che ha la pressione  $P$ , connesso, tramite un condotto di conduttanza  $C$ , ad una pompa ideale che alla pressione di lavoro  $P_p$  ha al suo ingresso una velocità di aspirazione  $\Sigma_p$ . Vogliamo ricavare la velocità di pompaggio efficace  $\Sigma_{eff}$  all'ingresso del recipiente.
- Ricordiamo la legge di Ohm della fluidodinamica che lega la differenza di pressione alla portata  $Q$  e alla conduttanza del condotto:

$$P - P_p = \frac{1}{C} Q \Rightarrow \frac{P}{Q} - \frac{P_p}{Q} = \frac{1}{C}$$

- La portata  $Q$  è la stessa in tutto il condotto. Ricordiamo invece che la portata volumetrica (cioè la velocità di aspirazione) dipende dalla pressione del gas in quel dato punto della sezione del condotto. Abbiamo pertanto le seguenti relazioni:

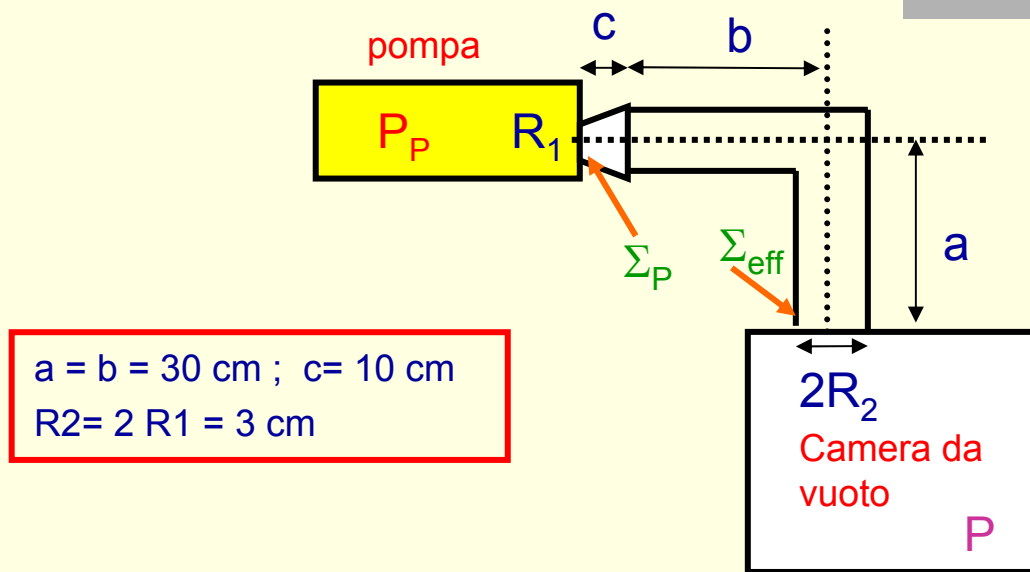
$$P \cdot \Sigma_{eff} = Q ; P_p \cdot \Sigma_p = Q \Rightarrow \frac{1}{\Sigma_{eff}} = \frac{P}{Q} ; \frac{1}{\Sigma_p} = \frac{P_p}{Q}$$

- Combinando insieme le precedenti relazioni, si ottiene:

$$\frac{1}{\Sigma_{eff}} = \frac{1}{C} + \frac{1}{\Sigma_p}$$

- $\frac{1}{C} \gg \frac{1}{\Sigma_p} \Rightarrow \frac{1}{\Sigma_{eff}}$  è determinata dalla conduttanza della linea
- $\frac{1}{C} \ll \frac{1}{\Sigma_p} \Rightarrow \frac{1}{\Sigma_{eff}}$  è determinata dalla velocità di aspirazione della pompa.

# Esempio di calcolo della conduttanza e della pressione di regime



- Supponiamo di avere a disposizione una pompa da vuoto che, alla pressione  $P_p = 10^{-1}$  mbar ha una portata volumetrica  $\Sigma_p = 100$  l/s. La pompa è connessa ad una camera a vuoto tramite, un tronco di cono e due condotti cilindrici disposti ad L. Le dimensioni dei condotti sono riportate in figura. Vogliamo dedurre quale sia la pressione finale  $P$  a cui si porta la camera da vuoto a regime.
- Calcoliamo innanzitutto la conduttanza equivalente del condotto, come somma delle conduttanze dei due cilindri e del tronco di cono. Assumiamo che il gas pompato sia aria a 300 K, e quindi  $\bar{u} = 468$  m/s.
- Dalle formule date precedentemente per il calcolo delle conduttanze, si ottiene:

$$C_{\text{cilindro}} = 70 \frac{l}{s}; \quad C_{\text{cono}} = 88 \frac{l}{s}$$

- Dalla regola di combinazione delle conduttanze in serie si ha:

$$\frac{1}{C_{\text{eq}}} = \frac{1}{C_{\text{cil}}} + \frac{1}{C_{\text{cil}}} + \frac{1}{C_{\text{con}}} \Rightarrow C_{\text{eq}} = 25 \frac{l}{s}$$

- (il calcolo della conduttanza è stato semplificato, non tenendo conto della configurazione ad L dei due tubi cilindrici. Un calcolo più accurato porta ad un aumento della conduttanza complessiva).

# Esempio ... continua

- Si può notare come in questo caso il valore della conduttanza sia più basso della velocità di pompaggio della pompa a disposizione.
- La portata della pompa per  $P_p=10$  mbar è:

$$Q = P_p \cdot \Sigma_p = (10^{-6} \text{ mbar})(100 \frac{l}{s}) = 10^{-4} \text{ mbar} \frac{l}{s}$$

- Dalla legge di Ohm della fluidodinamica si ottiene:

$$P - P_p = \frac{1}{C_{eq}} Q \Rightarrow P = P_p + \frac{1}{C_{eq}} Q$$

$$P = 10^{-6} \text{ mbar} + \frac{10^{-4} \text{ mbar} \cdot l/s}{25 l/s} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ mbar}$$

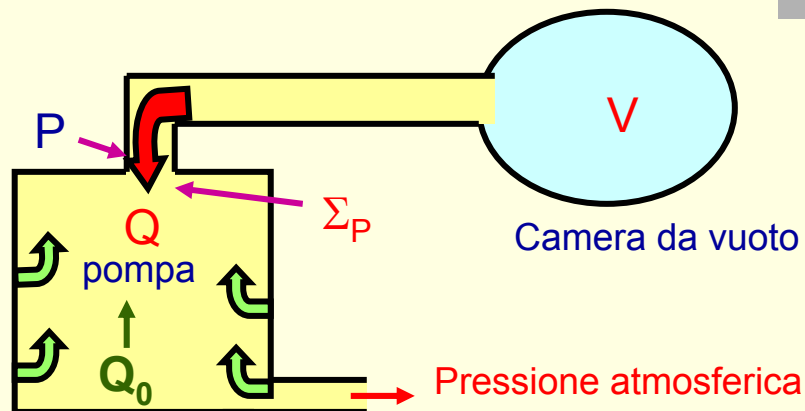
- Questo esempio mostra che non conviene connettere la camera da vuoto ad una pompa avente  $\Sigma_p \gg C_{eq}$ , in quanto il costo della pompa cresce al crescere di  $\Sigma_p$  e noi, in questa configurazione di pompaggio, non usufruiremo della sua maggiore portata volumetrica.
- Calcoliamo quanto vale la velocità di pompaggio efficace  $\Sigma$  all'imbocco della camera da vuoto:

$$\Sigma_{eff} = \frac{Q}{P} = \frac{10^{-4} \text{ mbar} \frac{l}{s}}{5 \cdot 10^{-6} \text{ mbar}} = 20 \frac{l}{s}$$

- Allo stesso risultato si giunge con la relazione:

$$\frac{1}{\Sigma_{eff}} = \frac{1}{C} + \frac{1}{\Sigma_p}$$

# Velocità di aspirazione di una pompa



- Consideriamo una pompa che stia aspirando del gas da una camera da vuoto. La portata  $Q$  quantifica il flusso di gas dalla camera alla pompa. La pompa trasferisce poi questo gas nell'atmosfera che si trova appunto a pressione atmosferica.
- Una pompa reale ha delle perdite che fanno sì che parte dell'aria presente nell'atmosfera rientri nella pompa. Inoltre ci sono altri fenomeni quali il degassamento da parte delle pareti della pompa, vapori di olio o altro che possono essere quantificati assumendo che vi sia un flusso  $Q_0$  di molecole che dalla pompa tornano verso la camera da vuoto.
- Se indichiamo rispettivamente con  $P$  e con  $\Sigma_p$  la pressione e la velocità di pompaggio (portata volumetrica) all'ingresso della pompa, avremo la relazione seguente:

$$Q + Q_0 = P \cdot \Sigma_p$$

- A noi interessa la portata  $Q$  che esprime la quantità di gas che viene evacuata dalla camera da vuoto:

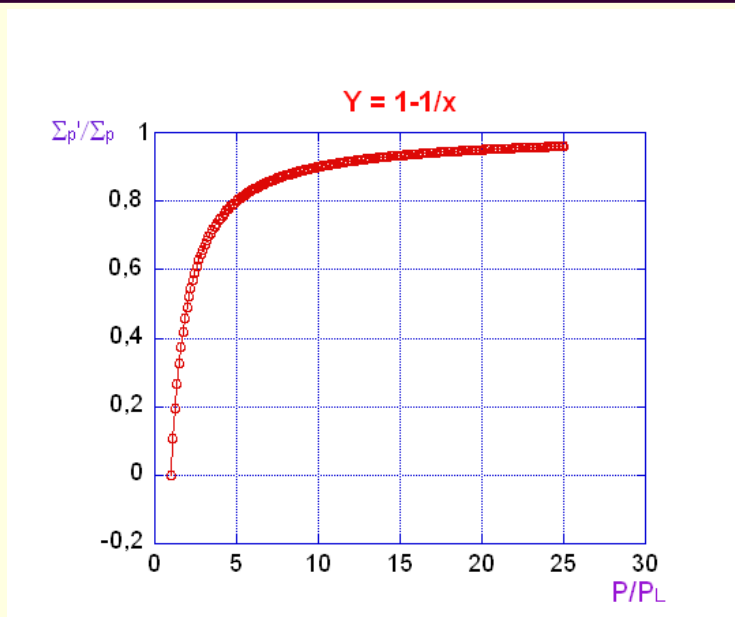
$$Q = P \cdot \Sigma_p - Q_0 = P \cdot \Sigma_p \left( 1 - \frac{Q_0}{P \cdot \Sigma_p} \right)$$

- Quando  $Q=0$  si è raggiunto il vuoto limite. Vuol dire che la pompa non sarà in grado di raggiungere al suo interno una pressione inferiore alla pressione limite  $P_L$ . La pressione nella camera da vuoto dipenderà anche dalla conduttanza del condotto, come abbiamo visto in precedenza.

$$Q_0 = P_L \cdot \Sigma_p$$



# Velocità di aspirazione effettiva di una pompa



$$Q_0 = P_L \cdot \Sigma_P$$

Da una misura della pressioni limite di una pompa e della velocità di aspirazione si può risalire alla perdita  $Q_0$  della pompa.

- Introduciamo la velocità di aspirazione effettiva della pompa così definita:

$$\Sigma'_P = \Sigma_P \left( 1 - \frac{Q_0}{P \cdot \Sigma_P} \right) = \Sigma_P \left( 1 - \frac{P_L}{P} \right)$$

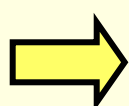
- In questo modo si stabilisce di nuovo la relazione tra la portata  $Q$  e la velocità di aspirazione della pompa:

$$Q = P \cdot \Sigma'_P$$

- Dalla relazione precedente, si può notare come la velocità di aspirazione effettiva di una pompa, per pressione limite diversa da zero, sia funzione della pressione  $P$ . Nel grafico si può osservare il rapporto tra la velocità di pompaggio effettiva e la velocità di pompaggio nominale in funzione del rapporto tra la pressione  $P$  e la pressione limite  $P_L$ . Si può notare come per pressioni all'interno della pompa inferiori a 5 volte la pressione limite, la velocità di pompaggio effettiva scenda rapidamente a zero.

- Ricordando che a valle di un'impedenza la velocità di aspirazione vale:

$$\frac{1}{\Sigma_{\text{eff}}} = \frac{1}{C} + \frac{1}{\Sigma'_P} \quad \text{dove:} \quad \Sigma'_P = \Sigma_P \left( 1 - \frac{P_L}{P} \right)$$



$$\Sigma_{\text{eff}} = \frac{1}{\frac{1}{C} + \frac{1}{\Sigma_P \left( 1 - \frac{P_L}{P} \right)}}$$

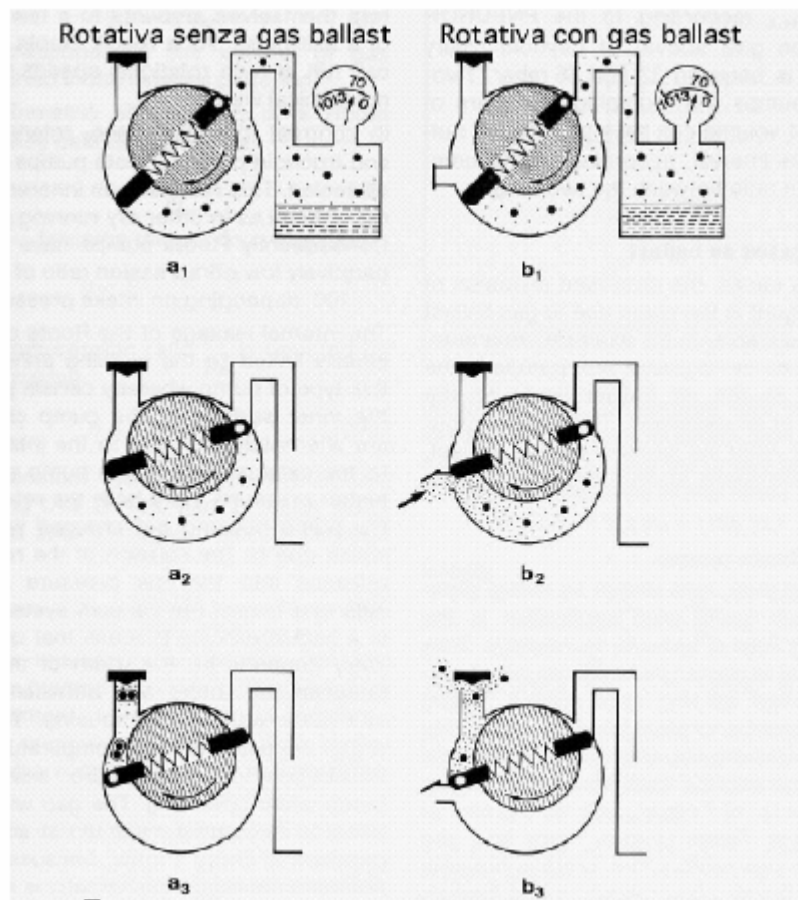
# Pompe da vuoto: introduzione

- Per evacuare una recipiente qualsiasi del fluido in esso contenuto, occorre stabilire una differenza di pressione tra il contenitore che si vuole vuotare ed un'altra regione di spazio. L'azione di bere latte con una cannuccia si basa, ad esempio, su questo principio, ovvero sulla differenza di pressione che si riesce a creare tra la bocca e la pressione atmosferica che agisce sul liquido.
- Le pompe da vuoto sono dei dispositivi aspiranti destinate a vuotare recipienti chiusi contenenti del fluido. Poiché il fluido su cui operano è di solito aria, esse vengono chiamate anche pompe pneumatiche. Esse possono essere di vario tipo:
- **Pompe meccaniche:** il funzionamento di questo tipo di pompe si basa sul movimento di organi meccanici. La pressione limite non è molto bassa dato che necessariamente le parti in movimento non possono avere una tenuta perfetta.
  - Tra le pompe meccaniche che vedremo più in dettaglio si ha la **pompa rotativa** in bagno d'olio. Il suo funzionamento si basa sulla rotazione di un'elica che, grazie al suo moto, consente di espellere l'aria all'esterno. Esse operano fin dalla pressione atmosferica, consentendo di raggiungere pressioni di circa  $10^{-2}$  torr.
  - Le **pompe turbo molecolari**, sono un raffinamento delle pompe rotative, in quanto sfruttano anch'esse la rotazione di opportune palette per espellere le molecole d'aria. Tuttavia mentre nelle rotative la velocità di rotazione dell'elica è di  $\approx 500/1000$  giri/minuto nelle turbo molecolari arriva a  $\approx 20000/40000$  giri/minuto. Come le pompe a diffusione anche le turbo molecolari richiedono per potersi innescare di un vuoto primario. Esse consentono di raggiungere pressioni di  $\approx 10^{-8}$  torr.

# Pompe da vuoto: introduzione

- **Pompe a getto d'acqua:** fu inventata da R.W.Bunsen, si basa sull'effetto Venturi, vale a dire sulla riduzione di pressione che si realizza nella strozzatura di un tubo percorso da un liquido. Questo tipo di pompa richiede acqua ad 1-2 atmosfere e permette di realizzare piccole portate e pressione limite di 20-25 Torr.
- **Pompe a vapore:** in questa categoria rientrano le pompe a diffusione.
  - La **pompa a diffusione d'olio** si può innescare a partire da pressioni di circa  $10^{-2}$  torr e consente di raggiungere pressioni di  $10^{-8}$  torr. Un fornello alla base della pompa riscalda un olio sintetico a bassa tensione di vapore, creando così un flusso di vapore che trascina con sé le molecole d'aria; queste, a loro volta, vengono espulse da una rotativa (collegata all'uscita della diffusione), mentre l'olio, fatto raffreddare per mezzo di un sistema di circolazione d'acqua, si ricondensa e ritorna nel fornello. Le pompe a diffusione hanno una buona efficienza, ma presentano alcuni svantaggi legati al processo di riscaldamento e raffreddamento dell'olio.
- Le **pompe a zeoliti** (o **pompe criogeniche**) si basano sulla caratteristica di questi silicati di "assorbire" a basse temperature le molecole dell'aria (si comportano come spugne). Non richiedono per funzionare di un vuoto primario e consentono di raggiungere pressioni dell'ordine di  $10^{-6}$  torr.
- Le **pompe ioniche** sono quelle che consentono di raggiungere le pressioni più basse, fino a  $10^{-10}$  torr. Richiedono un vuoto primario molto buono,  $\approx 10^{-5}$  torr. Il loro principio di funzionamento è il seguente: il gas rarefatto che si trova all'interno del recipiente viene ionizzato e quindi, sotto l'azione di un campo elettrico, le molecole e gli atomi ionizzati vengono accelerati verso un catodo ricoperto di ossido di titanio sul quale si fissano.

# Pompa rotativa

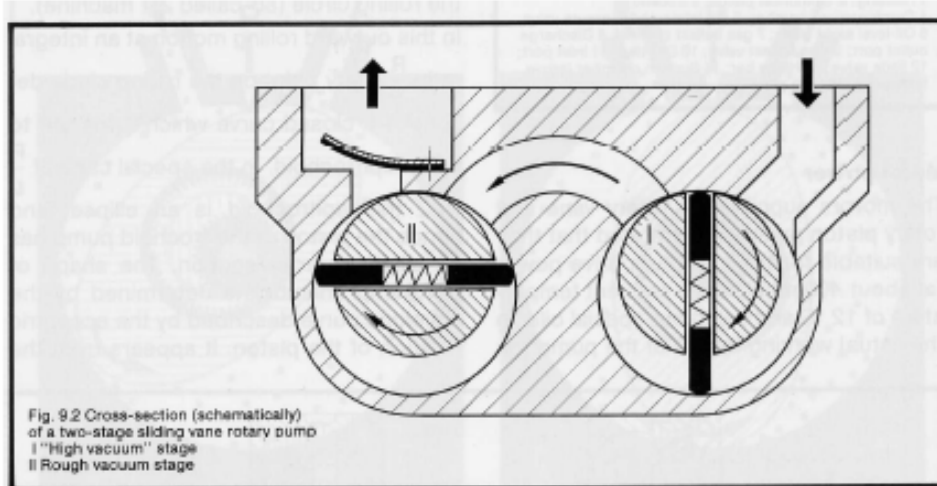


- Nella figura , sul suo lato sinistro, sono riportate le varie fasi di funzionamento di una pompa rotativa a palette; discuteremo più tardi la parte destra della figura. Il corpo centrale di una pompa rotativa a palette è costituito da una cavità cilindrica entro la quale ruota, attorno ad un asse traslato rispetto all'asse della cavità(eccentrico) , un rotore che ha una scanalatura lungo una direzione diametrale. In essa vi sono alloggiati due palette che aderiscono alla parete della cavità cilindrica in virtù dell'azione della molla compressa tra le due palette. Qui abbiamo schematizzato l'azione della pompa dividendola in tre fasi successive: (a1) Il gas dell'impianto da vuotare è aspirato nella zona punteggiata. (a2) Il gas è quindi trascinato in rotazione e compresso. (a3) Esso è quindi espulso attraverso la valvola.
- Da notare che prima di essere espulso il gas deve raggiungere una pressione superiore a quella atmosferica.

# Pompa rotativa

- In generale nelle pompe meccaniche, la lubrificazione delle parti in moto e la tenuta da vuoto del sistema sono assicurate da oli speciali (a bassa tensione di vapore). La pressione di scarico dei gas compressi deve essere più elevata della pressione atmosferica, per cui sono necessari rapporti di compressione molto grandi (dell'ordine di  $10^5$ ) per ottenere una pressione finale di 1 Pa all'ingresso della pompa.
- La pressione finale delle pompe rotative (ad un singolo stadio) ricade tipicamente nell'intervallo che si estende da 1 Pa (per le pompe di piccola portata volumetrica  $\Sigma \ll 50 \text{ m}^3/\text{h}$ ) a  $10^{-1}$  Pa (per le pompe con velocità di pompaggio più elevata). Tale limite non è determinato dal meccanismo di pompaggio, ma è imposto dalla solubilità dei gas nell'olio lubrificante. Infatti l'olio espulso attraverso la valvola di scarico e saturo dei gas o vapori che si sono in esso disciolti durante la fase di compressione, ritorna nel serbatoio dell'olio e successivamente è immesso di nuovo nella cavità cilindrica. Lì rilascia parte dei gas o vapori disciolti nell'olio ed in questo processo si possono determinare le condizioni per un sensibile peggioramento delle prestazioni della pompa.
- In particolare, quando i gas aspirati sono in prevalenza vapori che si condensano nella fase di compressione (ad esempio vapori di acqua), per evitare il verificarsi di questa circostanza si ricorre ad un particolare accorgimento: zavorrare la pompa con l'aria dell'ambiente (apertura del *gas ballast*). Questo è possibile perché la pompa rotativa presenta un'entrata supplementare posta in comunicazione con l'ambiente: in pratica vi è una valvola manuale *V* ad apertura regolabile dall'operatore. Durante la rotazione del pistone, quando il recipiente da evacuare è isolato dal vano d'aspirazione e di compressione della pompa, si apre la valvola *V* ed il vano si riempie d'aria aggiuntiva (la zavorra). In questo modo la pressione di scarico viene raggiunta molto prima che possa aver luogo la condensazione dei vapori e quindi la pompa espelle contemporaneamente i gas ed i vapori. Occorre però notare che in condizioni di *gas ballast* aperto la pompa perde d'efficienza. Il funzionamento della pompa dotata di *gas ballast* è riportato sul lato sinistro della figura.

# Pompa rotativa a doppio stadio



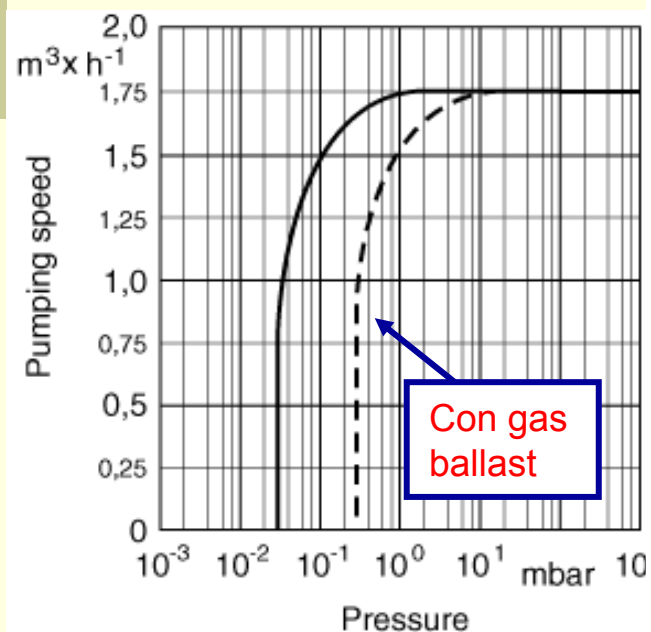
- Per aumentare la velocità di pompaggio e diminuire la pressione limite, sono state realizzate pompe rotative a doppio stadio. Nella figura è riportato uno schema semplificato di tali pompe.
- L'utilizzo del doppio stadio permette di ridurre la pressione limite di 2 ordini di grandezza. La pressione limite per una pompa rotativa ad uno stadio è dell'ordine del Pascal, mentre con una pompa a doppio stadio si possono raggiungere  $10^{-2}$  Pa.
- La pompa rotativa viene anche usata come primo stadio per altri tipi di pompe, quali ad esempio la pompa turbomolecolare o la pompa a diffusione, che hanno bisogno di un prevuoto e non possono funzionare a partire dalla pressione atmosferica.

# Pompa rotativa Leybold Trivac S 1.5

Pompa rotativa a singolo stadio in bagno d'olio, dotata di gas ballast, utilizzata nelle esercitazioni di laboratorio.



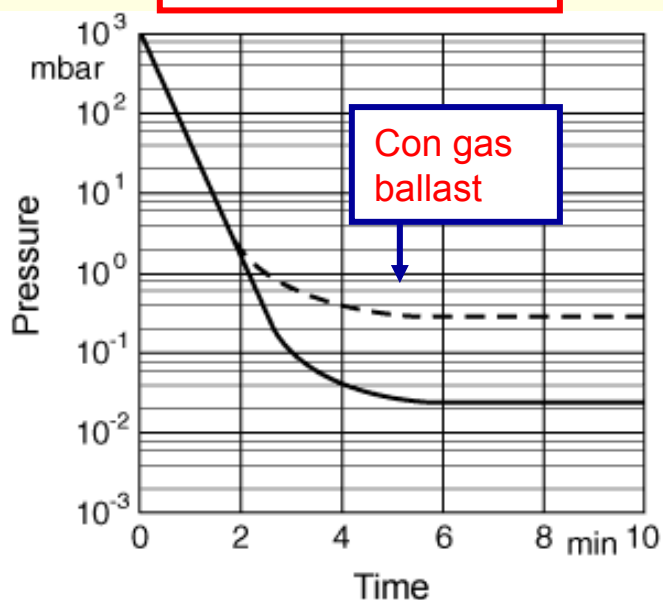
Velocità di pompaggio effettiva in funzione della pressione



Velocità di pompaggio  $1.75 \text{ m}^3/\text{h}$

Al di sotto di  $\approx 1 \text{ mbar}$ , senza gas ballast, la velocità di pompaggio diminuisce

Caratteristiche di svuotamento di un recipiente di 10 litri

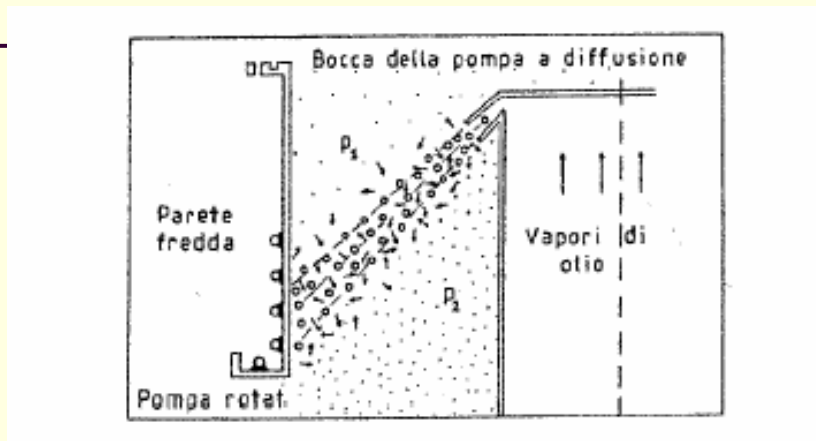


Pressione limite senza gas ballast =  $3 \cdot 10^{-2} \text{ mbar}$

Pressione limite con gas ballast =  $5 \cdot 10^{-1} \text{ mbar}$



# Le pompe a diffusione



- Le pompe a diffusione non possono immettere i gas aspirati direttamente nell'atmosfera come nel caso delle pompe rotative, perché la loro pressione di lavoro si estende da qualche  $10^{-1}$  a  $10^{-8}$  Pa per tutti i gas. Occorre prevedere allora che il recipiente da vuotare sia inizialmente connesso ad una pompa meccanica (pompa primaria) che porti il vuoto a valori tali da cadere nell'intervallo operativo della pompa a diffusione.
- Nelle pompe a diffusione si utilizza un getto di molecole ad alta velocità di un vapore che ha la funzione di trasferire per urto quantità di moto alle molecole del gas da evacuare in direzione della bocca di pompaggio. Nelle prime pompe si utilizzavano vapori di mercurio, nelle pompe attuali si utilizzano oli speciali con tensioni di vapore a temperatura ambiente di  $5 \cdot 10^{-7}$  -  $10^{-8}$  Pa. In figura è mostrato lo schema di funzionamento del getto molecolare. Le molecole di vapore, provenienti dal liquido in ebollizione localizzato alla base della pompa, passando attraverso una strozzatura anulare (a forma di becco), acquistano velocità di alcune centinaia di m/s dirette verso il basso, dove si trova la bocca di aspirazione connessa alla pompa meccanica che assicura il pre-vuoto, e verso la parete fredda della pompa. Le molecole del gas che arrivano alla bocca della pompa a diffusione vengono trascinate nel getto di vapore ed acquistano una quantità di moto diretta verso il basso. Quando le molecole di vapore del getto incidono sulla parete fredda vengono condensate e ritornano sotto forma di liquido nel bagno che sta alla base della pompa, assicurando la continuità del meccanismo di pompaggio. Il trasferimento di una quantità di moto netta alle molecole dei gas che attraversano il getto si traduce in una differenza di densità molecolare e quindi di pressione tra le due regioni separate dal getto di vapore.



# Misura della pressione negli impianti da vuoto

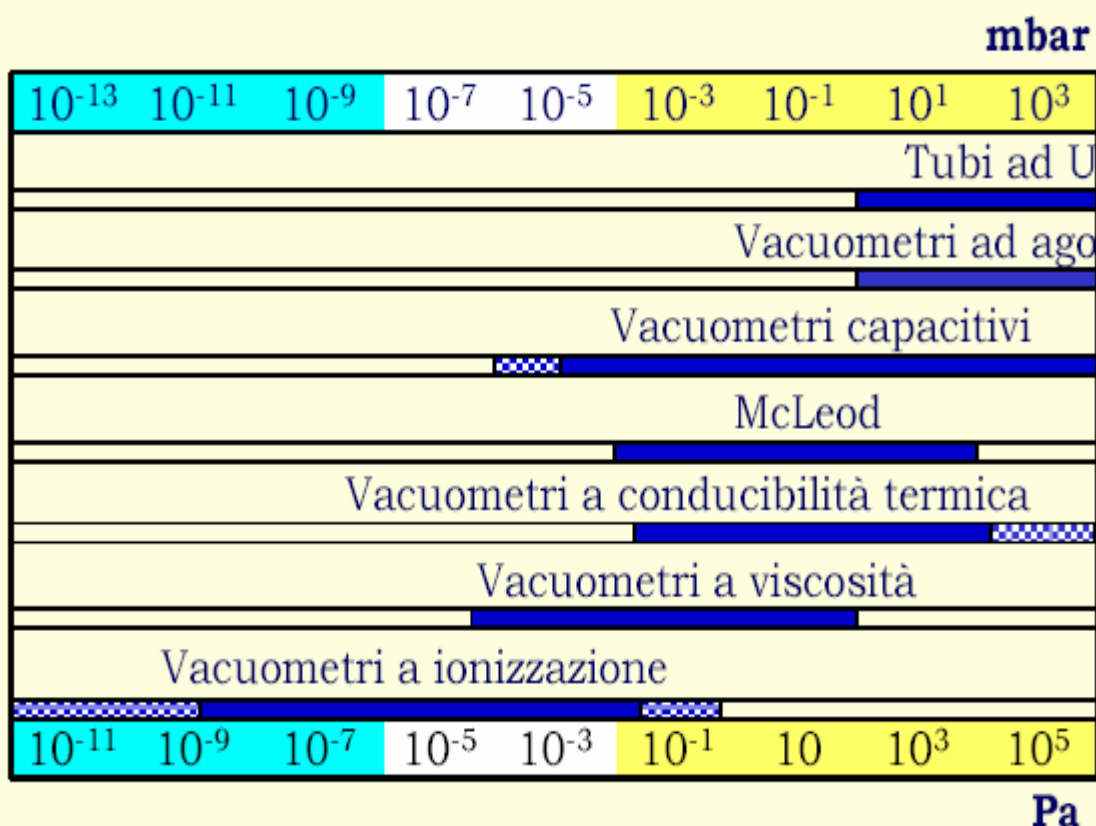
- Esistono decine di metodi e di dispositivi atti a misurare la pressione residua ma soltanto pochi di questi sono largamente utilizzati. Gli strumenti che misurano direttamente la pressione, sono detti genericamente **manometri**.
- Essi possono distinguersi in strumenti atti a misurare il valore assoluto della pressione, **manometri assoluti**, o la differenza di pressione tra due punti o due ambienti specifici, **manometri differenziali**.
- I manometri assoluti che misurano la pressione nell'intorno di quella tipica dell'atmosfera terrestre sono detti **barometri**.
- Gli strumenti che misurano pressioni inferiori a quella atmosferica sono denominati **vacuometri**. Poiché si tratta di coprire un vastissimo intervallo di pressioni che va da  $10^5$  a  $10^{-12}$  Pa, occorre concepire strumenti di natura diversa che siano in grado di coprire questo intervallo di 17 ordini di grandezza sfruttando differenti proprietà dei gas rarefatti.
- Generalmente, per i vacuometri, non serve una elevata accuratezza,  $\pm 10\%$  è sufficiente.
- Alcuni sensori non misurano la pressione direttamente, ma misurano altre proprietà che dipendono a loro volta dalla pressione del gas. La risposta di molti sensori dipende dal tipo di gas.
- Tuttavia nei vacuometri è normalmente richiesta una risposta veloce a causa delle fluttuazioni del sistema sotto esame. Non va comunque trascurato il fatto che la misura dipende dalla posizione del sensore, dato che in genere il sistema non si trova in uno stato di equilibrio termodinamico.

# Classificazione dei vacuometri

<b><i>Vacuometri basati sulla misura di una forza</i></b>	<b><i>Vacuometri a conducibilità termica</i></b>	<b><i>Vacuometri a ionizzazione</i></b>
Manometro a tubo ad U Vacuometro McLeod Vacuometro Bourbon Manometro capacitivo Manometro piezo-resistivo	Pirani Termocoppia	Vacuometri a scarica Vacuometri a catodo caldo Vacuometri a catodo freddo

- Generalmente possiamo affermare che lo strumento di misura risulta tanto più complesso quanto più il gas è rarefatto. I vari tipi di vacuometri possono essere raggruppati sia sulla base dell'intervallo di pressione in cui operano, sia secondo il criterio del principio fisico su cui si basa lo strumento. In tabella riportiamo alcuni vacuometri raggruppati seguendo il secondo criterio.
- Nella prima colonna compaiono alcuni vacuometri che misurano direttamente la pressione (ovvero una forza per unità di superficie), essi sono quindi degli strumenti meccanici che misurano essenzialmente lo spostamento di una superficie.
- Esistono poi dei vacuometri che utilizzano delle proprietà legate ai fenomeni di trasporto, quali ad esempio la conducibilità termica o la viscosità, che in regime molecolare dipendono dalla pressione, al contrario di quanto accade in regime viscoso. Nell'intervallo di pressioni che va da  $10^{-2}$  Pa a  $10^2$  Pa la conducibilità diminuisce linearmente con la pressione.
- Infine esistono dei vacuometri a ionizzazione, che legano la misura della pressione alla misura della carica raccolta da un catodo.

# Intervalli di utilizzo dei vacuometri

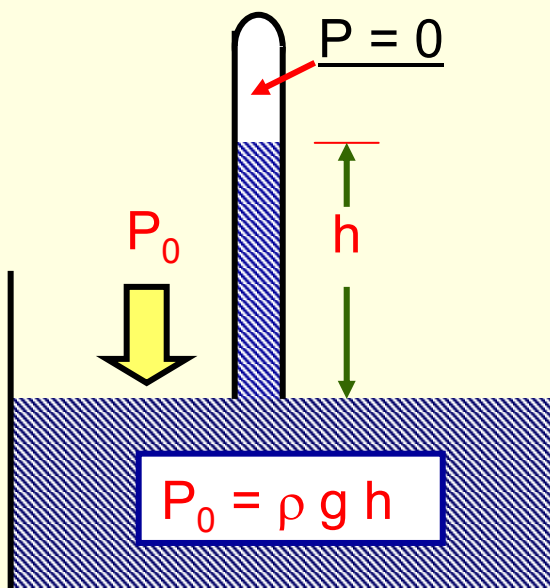


- Nel grafico è mostrato l'intervallo di utilizzo di alcuni vacuometri.
- Nella tabella successiva diamo invece alcuni fattori di conversione tra le diverse unità di misura adottate per la pressione. Ricordiamo che un Torr è pari ad 1 mm di Hg quando la densità del mercurio è uguale a 13.5955 g/cm<sup>3</sup> e l'accelerazione di gravità g vale 9.80665 m/s<sup>2</sup>

Fattori di conversione validi a 0°C

	Pa	mbar	torr	atm	mm H <sub>2</sub> O
Pa	1	10 <sup>-2</sup>	7.5·10 <sup>-3</sup>	9.87·10 <sup>-6</sup>	0.1
mbar	100	1	0.75	9.87·10 <sup>-4</sup>	10
torr	133	1.33	1	1.32·10 <sup>-3</sup>	13.3
atm	1.013·10 <sup>5</sup>	1013	760	1	10 <sup>4</sup>
mm H <sub>2</sub> O	10	0.1	7.5·10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-4</sup>	1

# Barometro di Torricelli e Tubo ad U



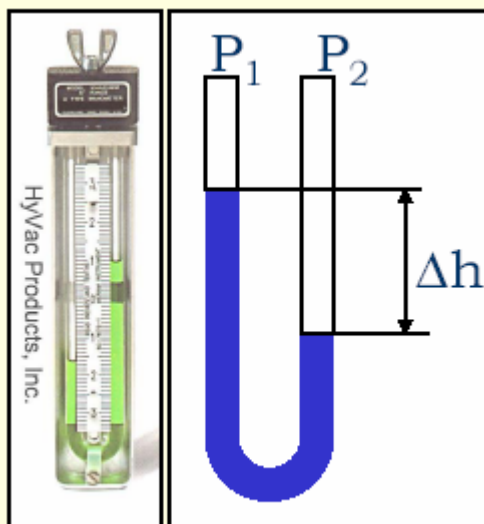
## Barometro di Torricelli

Il barometro più semplice è mostrato in figura. In linea di principio è sufficiente rovesciare un tubo pieno di liquido in modo che la sua apertura risulti immersa nel liquido del contenitore a più grande sezione. L'altezza del liquido nel tubo rovesciato da una misura della pressione  $p_0$  esercitata dal gas sulla superficie del contenitore più grande.

Legge di Stevino:  $P_0 = \rho g h$  ( $\rho$  è la densità del liquido)

Affinché si possa dedurre  $p_0$  dalla misura di  $h$  occorre conoscere  $g$  e  $\rho$ . Si noti che queste quantità non sono costanti: la prima varia con la latitudine mentre la seconda è funzione della temperatura. Inoltre in linea di principio occorre correggere le misure per l'effetto della pressione residua di gas intrappolato nella parte alta del tubo rovesciato.

## Tubo ad U

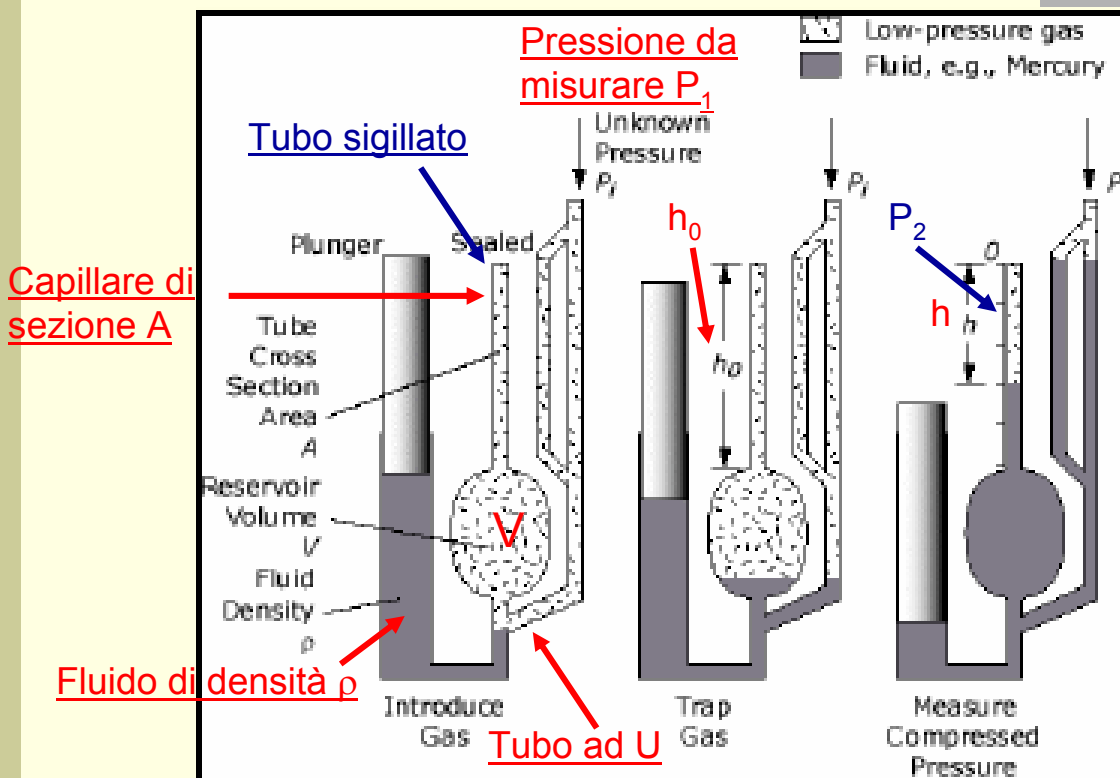


- Classico dispositivo basato sull'idea di Torricelli

$$P_2 - P_1 = \rho g h$$

- Il fluido deve avere elevata tensione superficiale ed una tensione di vapore trascurabile rispetto alla pressione da misurare
- Fragile e soggetto ad instabilità meccaniche

# Vacuometro di McLeod



Capillare di sezione  $A$

Fluido di densità  $\rho$

- Il vacuometro di McLeod permette di fare una misura assoluta della pressione  $P$  utilizzando un tubo ad U particolare, in cui il volume di uno dei due bracci è molto maggiore dell'altro per via di un grosso bulbo di volume  $V$ .
- Inizialmente il gas di cui si vuole misurare la pressione occupa tutto il volume del tubo ad U.
- Successivamente si spinge il liquido di misura, ad esempio mercurio, verso il tubo ad U. Questo si può fare tramite un pistone o con altri mezzi. In questo modo il gas rimane intrappolato nel braccio del tubo ad U che contiene il bulbo. Questo braccio è sigillato ed il gas non può più scappare.
- Si continua a spingere il liquido fino a far raggiungere al liquido nel secondo braccio un livello pari all'estremo superiore del capillare nel primo braccio del tubo ad U.

# Vacuometro di McLeod

- Il rapporto tra il volume del bulbo ed il volume del capillare sovrastante è molto grande, dell'ordine di  $10^5$ . Questo rapporto  $R$  costituisce una sorta di fattore di amplificazione della pressione da misurare  $P_1$ .

$$R = \frac{V}{A \cdot h_0} \approx 10^5$$

Infatti il gas che si trovava inizialmente nel bulbo alla pressione da misurare  $P_1$ , viene ora compresso in un volume molto più piccolo, e quindi la sua pressione deve aumentare in osservanza della legge di Boyle (facciamo l'ipotesi ragionevole che la temperatura non cambi) e raggiunge la pressione  $P_2 \approx R \cdot P_1$ .

- Il gas che si trova nell'altro braccio del tubo ad  $U$ , si trova invece sempre alla pressione  $P_1$ , quindi si osserverà una differenza di quota tra i due capillari nei due bracci del tubo ad  $U$ . (Il secondo braccio del tubo ad  $U$  è costituito da due tubi in parallelo, uno avente la stessa sezione  $A$  del capillare sovrastante il bulbo, e l'altro con una sezione maggiore. La differenza di quota viene valutata nei due capillari aventi la stessa sezione, in modo che eventuali effetti sistematici legati alla dimensione del capillare si compensino).

- Quindi avremo:  $P_2 = P_1 + \rho g h \approx \rho g h$  ( $P_2 \gg P_1$ )

- D'altra parte  $P_2$  e  $P_1$  sono legati dalla legge di Boyle:

$$P_1 \cdot V = P_2 \cdot A \cdot h \Rightarrow P_1 = \frac{P_2 \cdot A \cdot h}{V}$$

(anche qui sfruttiamo l'ipotesi che  $V \gg A \cdot h_0$ ). Sostituendo nella relazione l'espressione per  $P_2$  abbiamo:

$$P_1 = \frac{\rho \cdot g \cdot A}{V} h^2$$

# Vacuometro di Mcleod

$$P_1 = \frac{\rho \cdot g \cdot A}{V} h^2$$

- Dalla misura della quota  $h$  si risale alla misura della pressione  $P_1$ .
- Si ricava in questo modo una scala quadratica che è molto vantaggiosa, soprattutto per la misura delle basse pressioni.
- L'intervallo di misura di questo vacuometro va tipicamente da  $10^3$  Pa fino a  $10^{-1}$  Pa e la sua accuratezza è dell'ordine del 10%.
- Ha il vantaggio di fare una misura diretta della pressione assoluta del gas, che non dipende dal tipo di gas stesso. Tuttavia, data la macchinosità nell'eseguire la misura, esso viene utilizzato soprattutto come strumento per tarare i vacuometri a misura indiretta.
- Gli svantaggi di questo strumento sono:
  - Non funziona con vapori che condensano nella fase di compressione
  - È estremamente fragile
  - È lento e complicato e quindi non consente misure dinamiche di pressioni che variano molto rapidamente
  - Non può essere interfacciato ad un sistema di lettura elettronico
  - Nel recipiente in cui si vuole misurare la pressione vengono immessi dei vapori di mercurio che potrebbero falsare la misura

# Vacuometri piezoresistivi

---

- L'elemento sensibile di un vacuometro piezoresistivo è costituito da un piccolo volume pressurizzato a bassa pressione chiuso a tenuta da un diaframma.
- La deformazione del diaframma comprime del materiale piezoresistivo, il quale ha la proprietà di cambiare la propria resistività in funzione dello sforzo meccanico applicato.
- La resistività, o per meglio dire la resistenza, di questo elemento piezoresistivo, viene misurata tramite un ponte di Wheatstone di resistenze.
- L'intervallo di misura di questo strumento va da 1 mbar fino a circa 2000 mbar, può misurare quindi anche pressioni superiori alla pressione atmosferica.
- Ha il vantaggio di avere come grandezza misurabile un segnale elettrico, quindi può essere interfacciato ad uno strumento di misura digitale. Inoltre è molto rapido e può seguire bene le variazioni della pressione da misurare.
- Ha lo svantaggio di richiedere frequenti calibrazioni, per cui non è molto preciso.