



Flussi e Conduttanze

REGIMI DI FLUSSO

Il flusso di gas all'interno dei sistemi da vuoto è un fenomeno complesso e una corretta descrizione dipende:

dalla quantità di gas che si sposta

dalle proprietà del particolare gas

dalla geometria delle superfici

dalle proprietà delle superfici

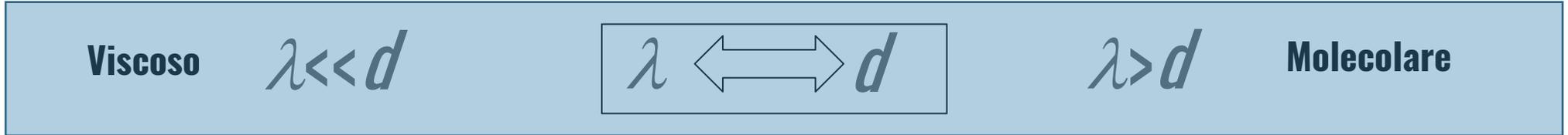
dalle canalizzazioni



In un sistema portato da pressione atmosferica all'alto vuoto il flusso passa attraverso tutti e tre i tipi di regime

REGIMI DI FLUSSO

Per capire in che regime siamo dobbiamo confrontare il libero cammino medio con le dimensioni del recipiente



Più in particolare ci vengono in aiuto le due seguenti quantità

R_e : Numero di Reynolds

ρ è la densità del gas di viscosità η che scorre in un tubo di diametro d con velocità U

$$R_e = \frac{U \times \rho \times d}{\eta}$$

K_n : Numero di Knudsen

λ È il libero cammino medio delle particelle di gas in un tubo di diametro d

$$K_n = \frac{\lambda}{d}$$

REGIMI DI FLUSSO		
Stato del gas	Regime di flusso	Condizione
Viscoso	Turbolento	$R_e > 2100$
		$Q > 200 d$ (aria)
	Laminare	$R_e < 1100$
		$Q < 100 d$ (aria)
Transizione	Intermedio	$K_n < 0.01$
Rarefatto	Molecolare	$0.01 < K_n < 1$
		$K_n > 1$

$Q = \text{throughput (gas flow)} \dots \text{ancora da definire}$

REGIMI DI FLUSSO

Spesso è comodo discriminare il tipo di flusso in base al prodotto

$$p \times d$$

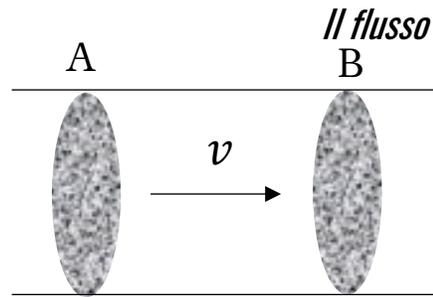
p: pressione all'interno del recipiente - *d*: dimensione caratteristica del recipiente

BASSO VUOTO		ALTO – ULTRA ALTO VUOTO
Flusso Viscoso	Flusso intermedio	Flusso molecolare
$p \times d > 0.6$	$0.6 > p \times d > 10^{-2}$	$p \times d < 10^{-2}$
$K_n < 10^{-2}$	$10^{-2} < K_n < 1$	$K_n > 1$

$$p \times d \text{ in Pa} \times \text{m}$$

FLUSSO DI GAS

PORTATA (THROUGHPUT)



Il flusso volumetrico q NON dà alcuna informazione sulla quantità di gas che attraversa una sezione

$$q = vA \quad \text{Per trasformarlo in flusso di massa dobbiamo moltiplicarlo per la densità} \quad G = \rho vA$$

Ma in vuoto la temperatura del gas solitamente diventa la temperatura delle pareti della camera, e se ipotizzata costante:

Al posto della densità uso
la pressione

PORTATA
(THROUGHPUT)

$$Q = \frac{d(pV)}{dt}$$

$$\left[\frac{\text{Torr} \times l}{s}, \frac{\text{mbar} \times l}{s}, \frac{\text{Pa} \times m^3}{s}, \dots \right]$$

Eq. di stato gas perfetti

$$pV = NkT \quad \longrightarrow \quad N = \frac{pV}{kT}$$

Se la temperatura è nota il
numero di particelle è
proporzionale al prodotto pV

pV è una
"quantità di gas"

PORTATA \neq FLUSSO DI MASSA

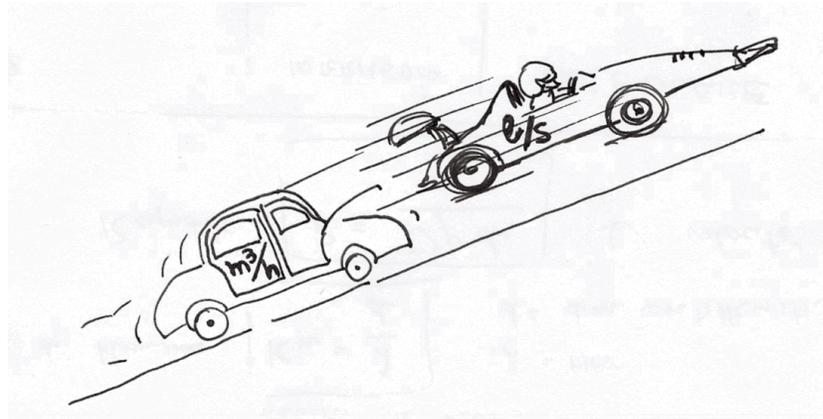
$$\frac{\text{Torr} \times l}{s} \neq \frac{\text{kg}}{s}, \quad \text{Esiste una relazione solo a } T \text{ costante e conosciuta}$$

VELOCITA' DI POMPAGGIO

ELEMENTO CARATTERISTICO DI OGNI POMPA DA VUOTO, DEFINITO COME:

$$S = \frac{Q}{p} \left[\frac{l}{s}, \frac{m^3}{h}, \dots \right]$$

Q è la portata e p la pressione nel punto dove si vuole conoscere la velocità di pompaggio
(per una pompa, la sua apertura di ingresso)

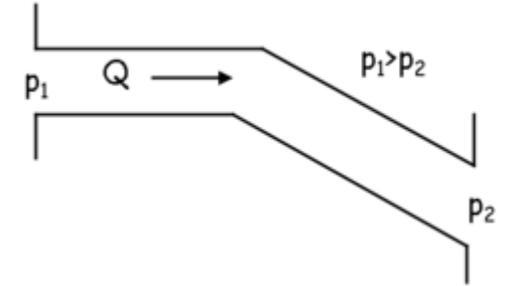


$$1 \text{ l/s} = 3,6 \text{ m}^3/\text{h}$$

CONDUTTANZA

ELEMENTO CARATTERISTICO DI UN COMPONENTE, DEFINITO COME:

$$C = \frac{Q}{p_1 - p_2} \left[\frac{l}{s}, \frac{m^3}{h}, \dots \right]$$



CONDUTTANZA \neq VELOCITA' DI POMPAGGIO

C è definita attraverso un componente, S attraverso un piano

LA CONDUTTANZA E' LA CAPACITA' DI UN'APERTURA O CANALIZZAZIONE DI LASCIAR
FLUIRE UN DETERMINATO VOLUME DI GAS IN UN'UNITA' DI TEMPO

Che differenza c'è tra conduttanza e velocità di pompaggio?

- a. Nessuna, entrambe sono una misura del volume di gas asportato da una camera, nell'unità di tempo
- b. Nessuna, entrambe misurano i litri al secondo necessari per vuotare un contenitore
-  c. La conduttanza è una caratteristica di una tubazione, la velocità di pompaggio è un flusso volumetrico misurato attraverso un piano
- d. La velocità di pompaggio è la portata alla bocca di una pompa da vuoto, la conduttanza è una proprietà di un tubo o un'apertura

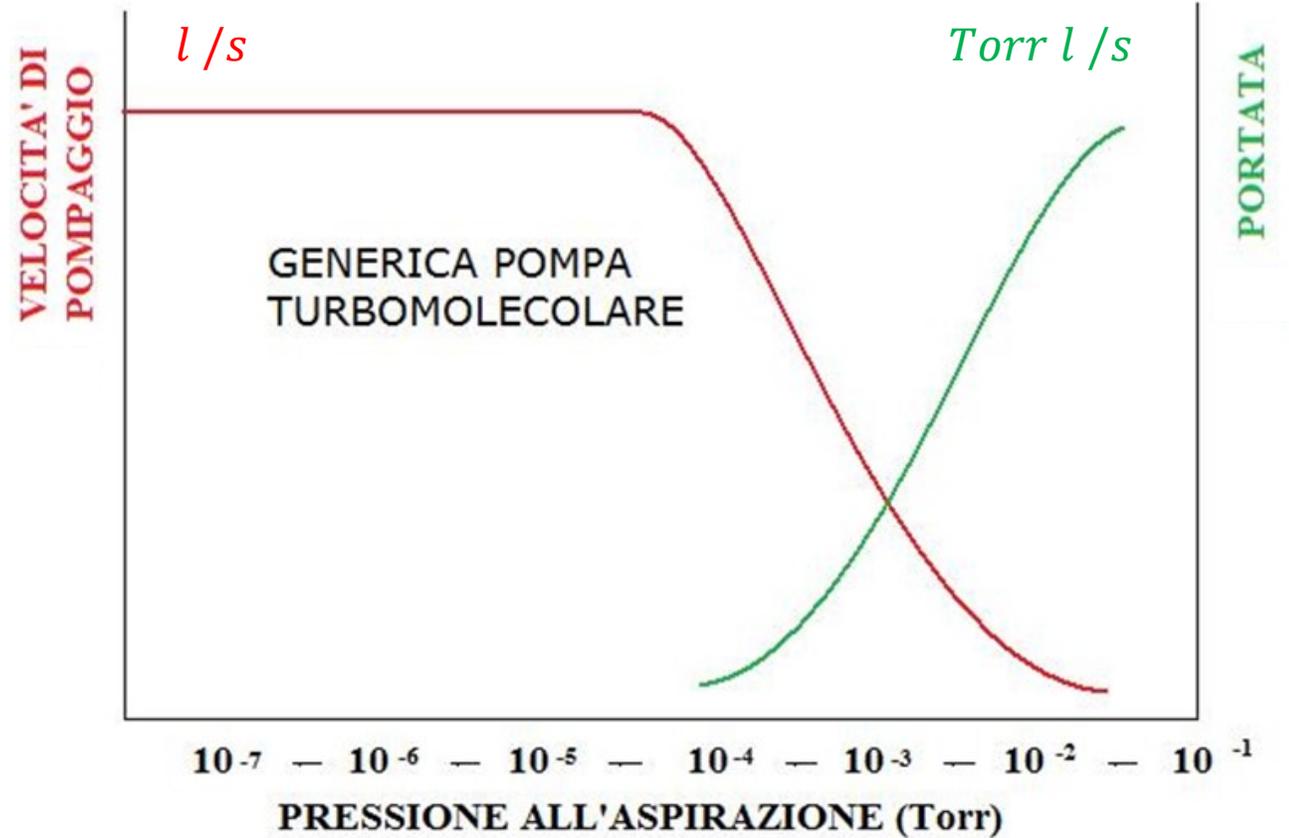
PORTATA/VELOCITA' DI POMPAGGIO

Un po' impropriamente ma per dare un'idea:

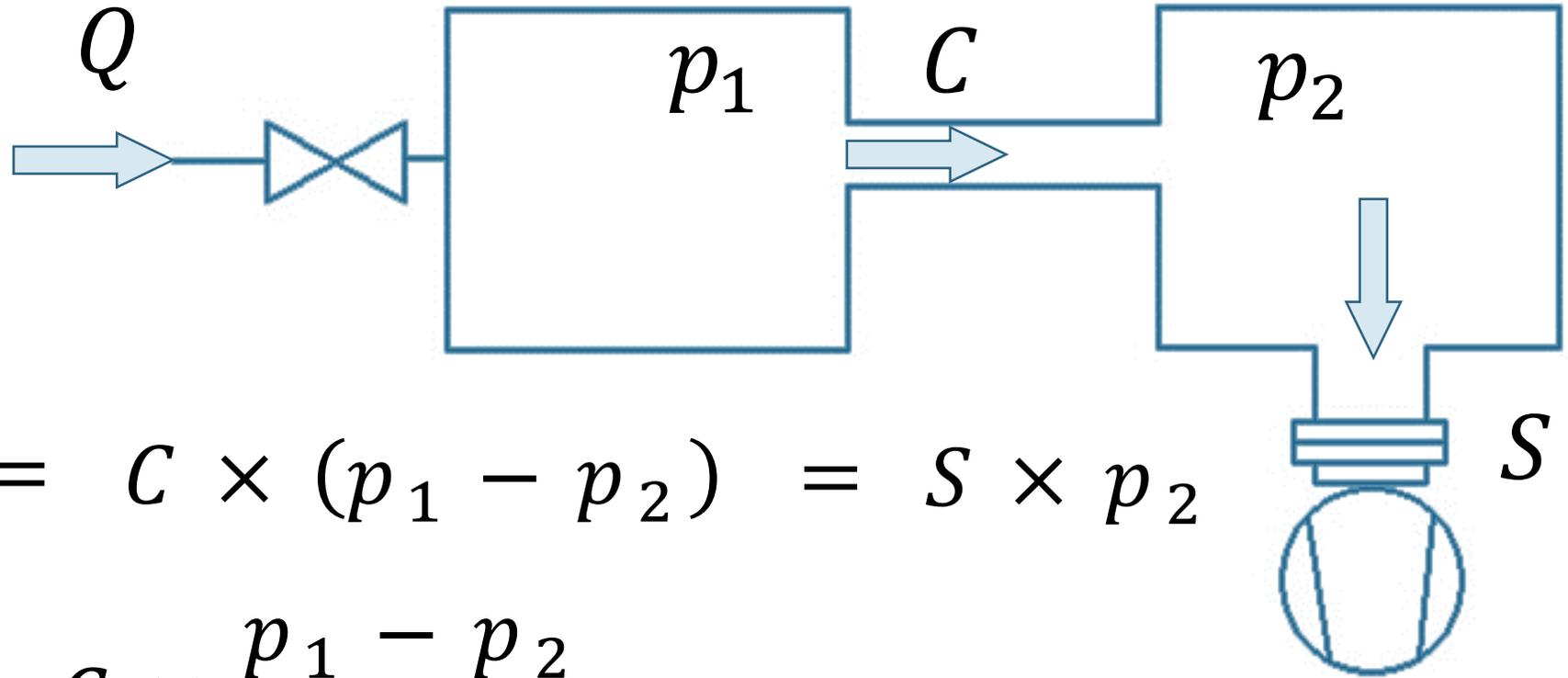
E' la portata che è la vera "capacità" di pompaggio: troppo facile pompare "volumi vuoti"

$$[\text{Pa m}^3 / \text{s}] = [\text{W}]$$

Q è l'energia per unità di tempo richiesta per "spostare" le particelle attraverso un piano



PORTATA/CONDUTTANZA/VELOCITA' DI POMPAGGIO



$$Q = C \times (p_1 - p_2) = S \times p_2$$

$$S = C \times \frac{p_1 - p_2}{p_2}$$

Questo può essere un modo per misurare la velocità di pompaggio di una pompa
(metodo della conduttanza nota)

CALCOLI DI CONDUTTANZE

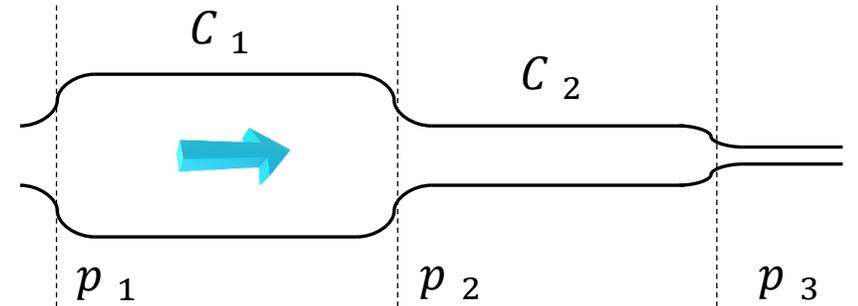
Analogia Elettrica

in serie

$$(p_1 - p_2) + (p_2 - p_3) = (p_1 - p_3)$$

$$\frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} = \frac{Q}{C_{eq}}$$

$$\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} = \frac{1}{C_{eq}}$$

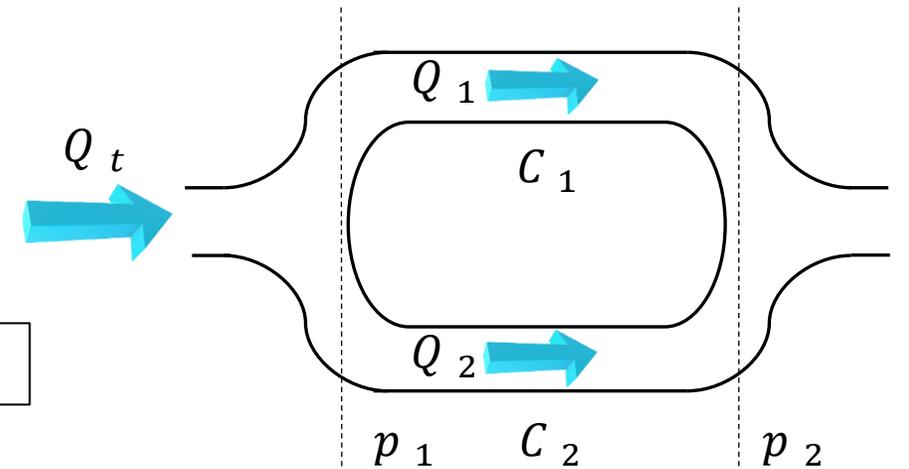


in parallelo

$$Q_1 + Q_2 = Q_t$$

$$C_1(p_1 - p_2) + C_2(p_2 - p_3) = C_{eq}(p_1 - p_3)$$

$$C_1 + C_2 = C_{eq}$$

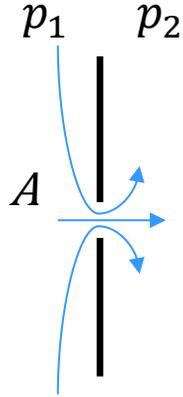


FLUSSO DI GAS

CALCOLI DI CONDUTTANZE

Flusso Viscoso

APERTURA



Supponendo $p_1 = \text{atm}$ e diminuendo p_2 Q aumenta, fino ad un valore massimo tale che velocità flusso = velocità suono. Se p_2 continua a diminuire Q NON AUMENTA PIU' → Il gas viaggia alla velocità del suono → «non può più comunicare al lato alta pressione che p_2 è cambiata»

$$Q = Q(p)$$

complicata

La forma di Q massimo è:

$$Q = Ap_1 C' \sqrt{\left(\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{kT}{m}\right) \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \sqrt{1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(\gamma-1)/\gamma}}$$

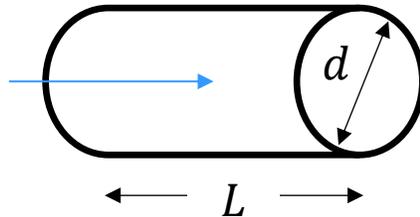
γ rapporto calori specifici
 C' fattore di riduzione (*vena contracta*)

FORMULA APPROSSIMATA

$$C = 20 \times A$$

C in l/s e A area apertura in cm^2

TUBO CILINDRICO LUNGO



Poiseuille (regime laminare)

$$Q = \frac{\pi d^4}{128\eta L} \times \bar{p} \times (p_1 - p_2) \left[\frac{\text{Pa} \times \text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

η viscosità
 $\bar{p} = (p_1 + p_2)/2$

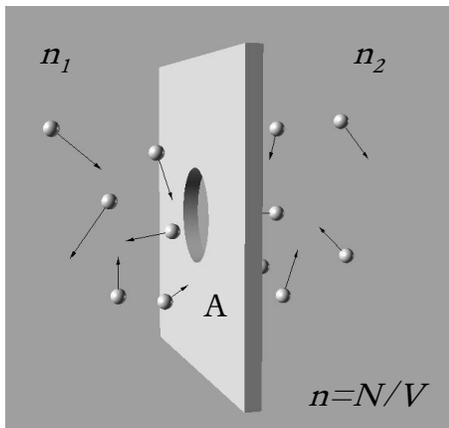
$L \gg d$

$$C = \frac{\pi d^4}{128L\eta} \times \bar{p} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

$$C = C(p)$$

FLUSSO DI GAS

APERTURA



NUMERO TOTALE DI URTI PER UNITA' DI SUPERFICIE E DI TEMPO

$$v = \frac{1}{4} \frac{N}{V} v_m$$

CALCOLI DI CONDUTTANZE

Flusso Molecolare

Da sx a dx: $v_1 = \frac{1}{4} n_1 v_m$, da dx a sx: $v_2 = \frac{1}{4} n_2 v_m$.

Flusso netto di particelle ($n_1 > n_2$) $\frac{dN}{dt} = \frac{1}{4} v_m A (n_1 - n_2)$.

Ricordando la definizione di portata: $Q = kT \frac{1}{4} v_m A (n_1 - n_2)$,

e la legge dei gas perfetti ($TN/V = p/R$), $Q = \frac{1}{4} v_m A (p_1 - p_2)$

con $M = (mR)/k$

$$C = \frac{1}{4} v_m A \rightarrow C = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} A$$

Per aria (N_2) @ $T_{ambiente}$

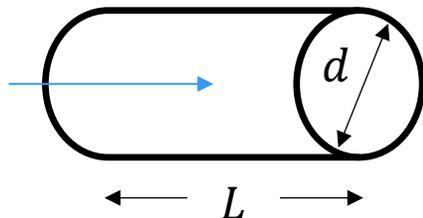
$$C_{N_2} = 11,6 \times A$$

Per generico gas g @ $T_{ambiente}$

$$C_g = C_{N_2} \sqrt{\frac{M_{N_2}}{M_g}}$$

C in l/s
 A in cm^2

TUBO CILINDRICO



LUNGO

$$L > 20d$$

Dall'espressione di Knudsen per Q

$$C = \frac{1}{12} \pi v_m \frac{d^3}{l}$$

CORTO

$$C = C_{apertura} \times a$$

a : probabilità di trasmissione

$$a = a(L/d)$$

(Vedere Appendice B)

CALCOLI DI CONDUTTANZE

Strutture tubolari arbitrariamente complesse

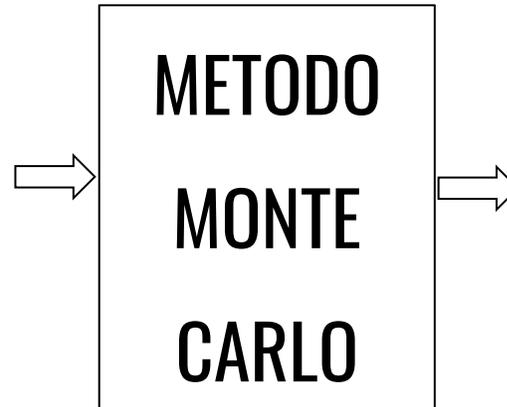
Conduttanze in flusso molecolare calcolate analiticamente solo in pochi casi

Hp.

1. Flusso stazionario
2. Regime molecolare
3. Distribuzione posizione e angolo di ingresso di una particella nella canalizzazione indipendente dalle altre particelle
4. Legge del coseno per le particelle dopo la riflessione dalle pareti



METODI PROBABILISTICI

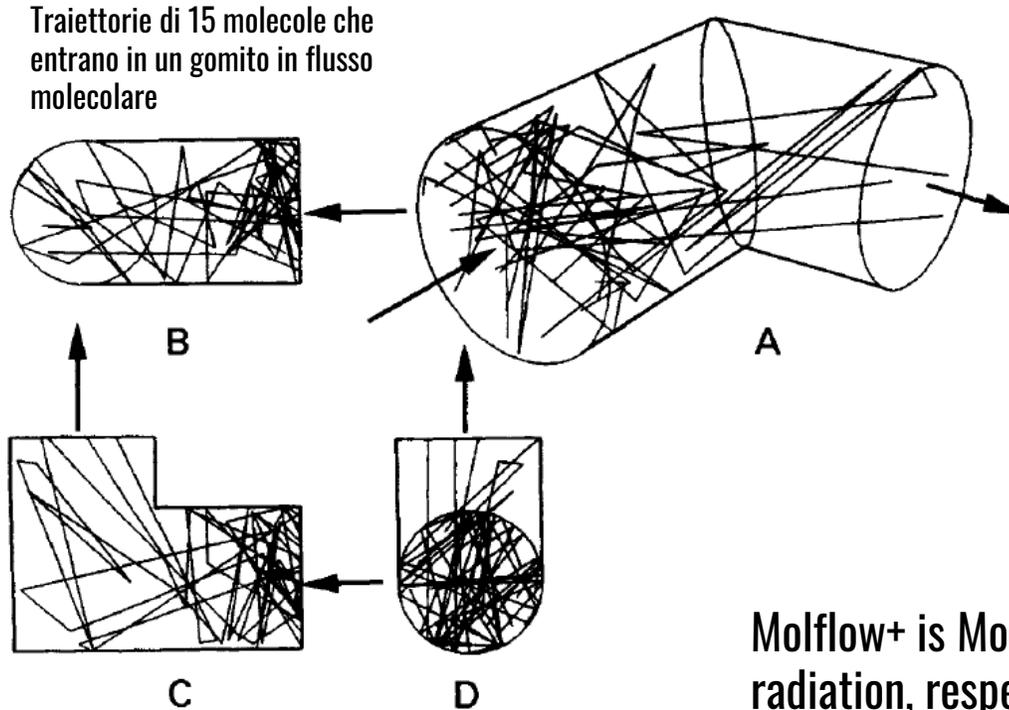


Tecnica:

Si simula la traiettoria individuale di un grande numero di particelle costituenti il gas, sotto le ipotesi precedenti. Ricavando il rapporto tra il numero di particelle entranti rispetto a quelle uscenti si ricava la **PROBABILITA' DI TRASMISSIONE**

CALCOLI DI CONDUTTANZE

Strutture tubolari arbitrariamente complesse



O'Hanlon "A User's Guide to Vacuum Technology" second edition, Wiley

FREE APPLET

<http://fisica.ufpr.br/sharipov/>

The applet calculates mass flow rates through pipes and orifices over the whole range of the gas rarefaction

Prof. Felix Sharipov Email: sharipov@fisica.ufpr.br

Molfow+

A test-particle Monte Carlo simulator for UHV systems

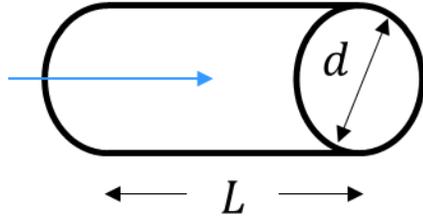
Molfow+ is Monte Carlo simulation tools for ultra-high vacuum and synchrotron radiation, respectively. Over the years they have become a common tool for designing and analysing the vacuum system of particle accelerators.

10th International Particle Accelerator Conference, Melbourne, Australia, 19 - 24 May 2019, pp.TUPMP037
DOI 10.18429/JACoW-IPAC2019-TUPMP037

CALCOLI DI CONDUTTANZE

Considerazione

Flusso molecolare, tubo cilindrico corto



,...potendo tollerare errori del 12%-15% si può usare l'approccio di Dushman: **CONDUTTANZE IN SERIE**

il tubo corto può essere visto come una serie di un'apertura e un tubo lungo

$$\frac{1}{C_{tubo\ corto}} = \frac{1}{C_{apertura}} + \frac{1}{C_{tubo\ lungo}}$$

MA ATTENZIONE !

NON FUNZIONA QUANDO SI COMBINANO DUE CONDUTTANZE DIRETTAMENTE

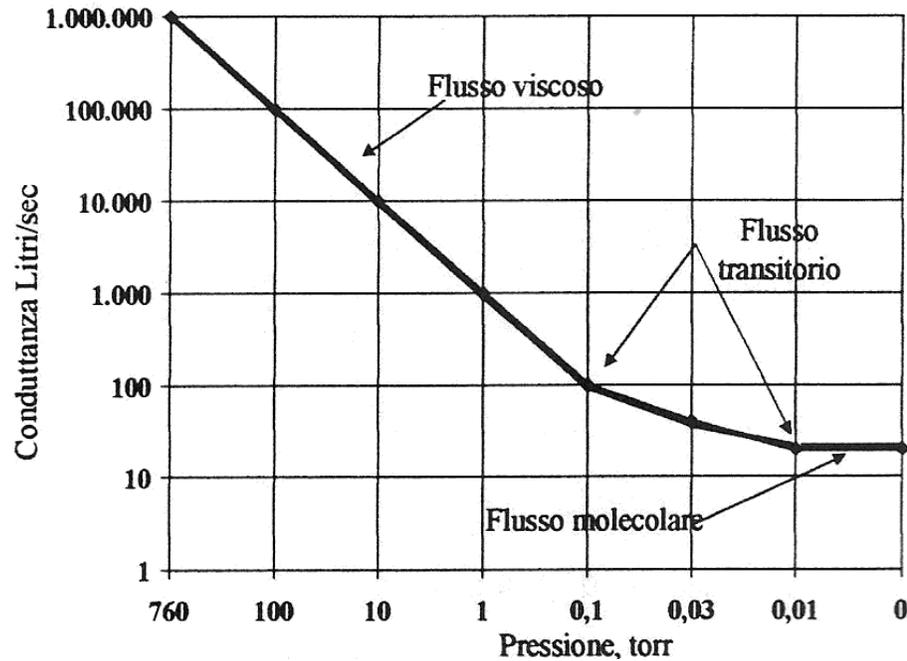
Vedi sezione esercizi

CALCOLI DI CONDUTTANZE

Considerazioni

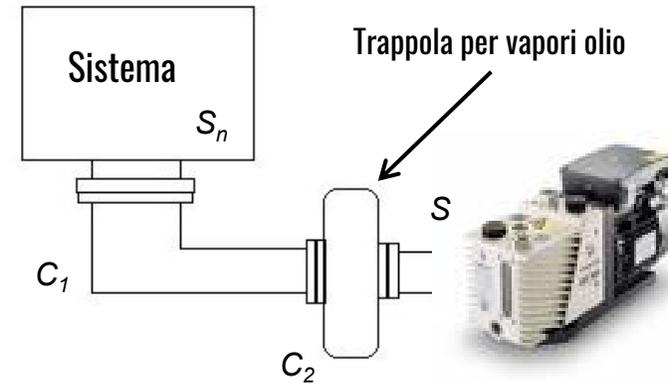
CONDUTTANZA VISCOSO/MOLECOLARE

Tubo cilindrico lungo 5 cm × 1 m



Le pompe primarie posso stare lontano dalla camera, le secondarie no

VELOCITA' NETTA DI POMPAGGIO



$$S_n = \frac{C_t \times S}{C_t + S} \quad \text{dove } C_t = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2}$$

$$S_n \neq S$$

FLUSSO DI GAS

REGIMI DI FLUSSO – CONDUTTANZE

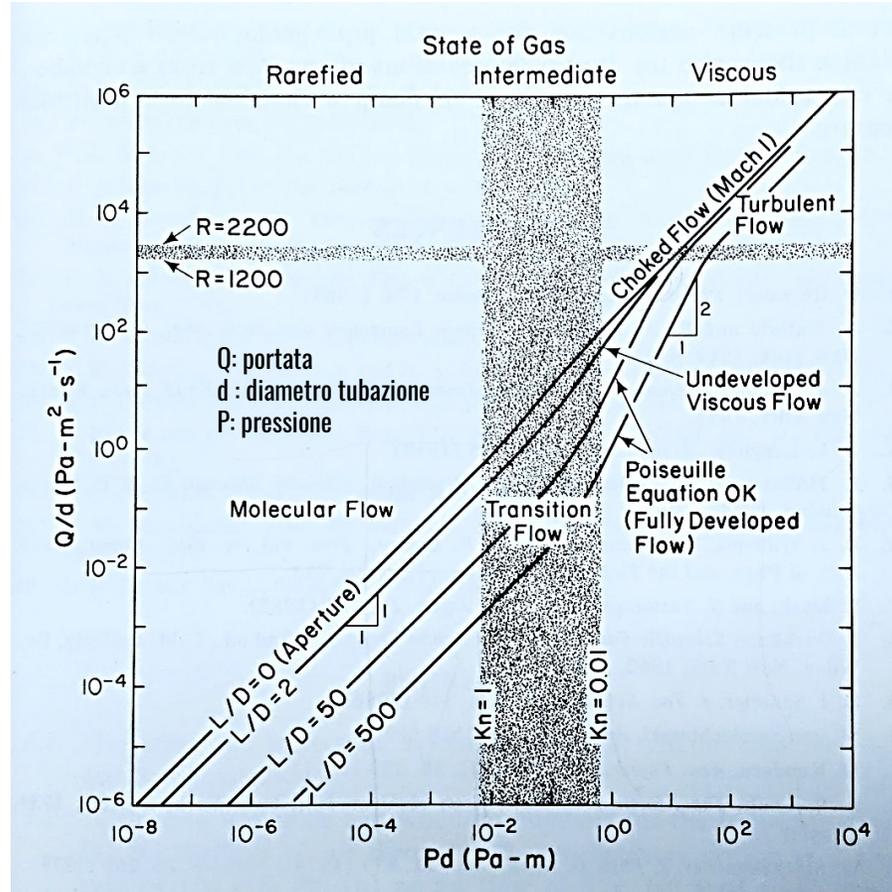
Riepilogo

Sintetica raffigurazione dei vari regimi di flusso in funzione:

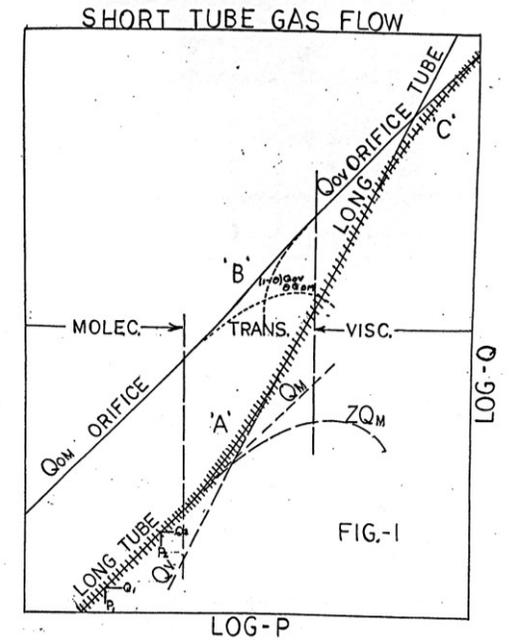
1. della geometria delle tubazioni
2. della portata
3. della pressione

Attenzione alla simbologia, per esempio:

1. $D = d$?
2. P upstream pressure?



...o un'alternativa



J. Vac. Sci. Technol. A, Vol 12, No 4, Jul, Aug 1994

FLUSSO DI GAS

QUANTITA' DI GAS CHE LASCIA LA CAMERA

Il segno meno indica una diminuzione di pressione

GAS CHE ENTRA NELLA POMPA

FLUSSO TOTALE DI GAS ENTRANTE NELLA CAMERA DOVUTO A:

EQUAZIONE GENERALE DEL POMPAGGIO

$$-V \frac{dp}{dt} = Sp - (Q_l + Q_d + Q_p)$$

- Q_l = FUGHE (*Permeation, Leaks*)
- Q_d = DEGASAGGIO DELLE PARETI INTERNE (*Desorption, Diffusion, Vaporisation*)
- Q_p = RETRODIFFUSIONE DALLA POMPA (*Backstreaming*)

