



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



Dipartimento
di Ingegneria Industriale

Le pompe volumetriche rotative

Corso di Macchine 1

Agenda

- ▶ Pompe volumetriche rotative a palette
 - ▶ Dimensionamento
 - ▶ Portata
 - ▶ Potenza assorbita
- ▶ Pompe volumetriche a ingranaggi (e a lobi)
- ▶ Curve caratteristiche delle pompe rotative
- ▶ Campi di impiego e condizioni di esercizio



Pompe volumetriche rotative a palette

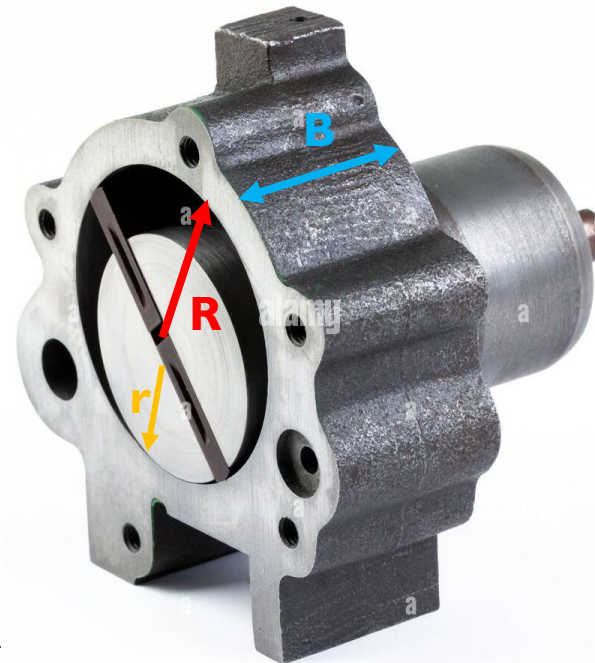
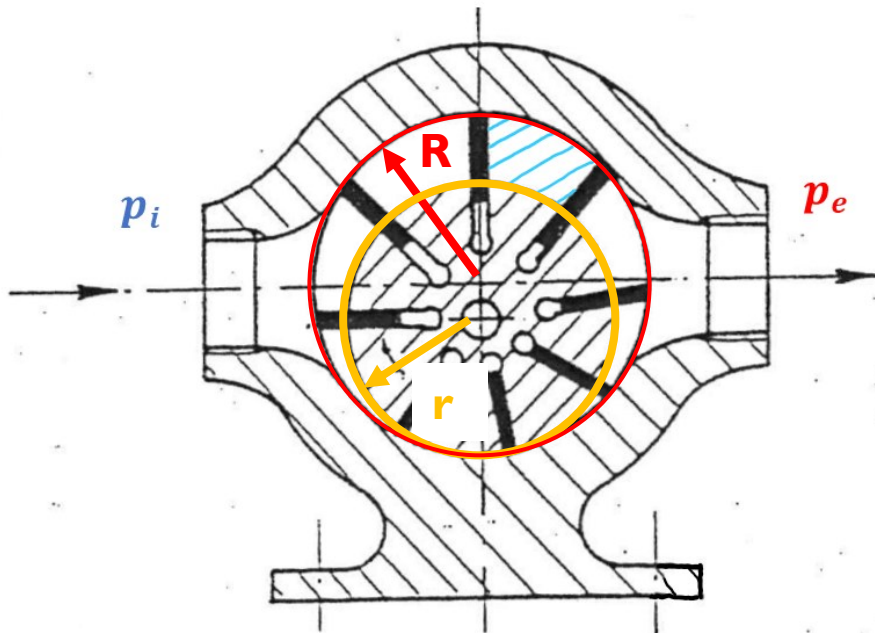
Geometria, Portata, Dimensionamento, Funzionamento a vuoto,
Potenza assorbita

Pompe rotative a palette: geometria

- La pompa rotativa a palette è costituita da una cassa con una camera cilindrica interna avente:

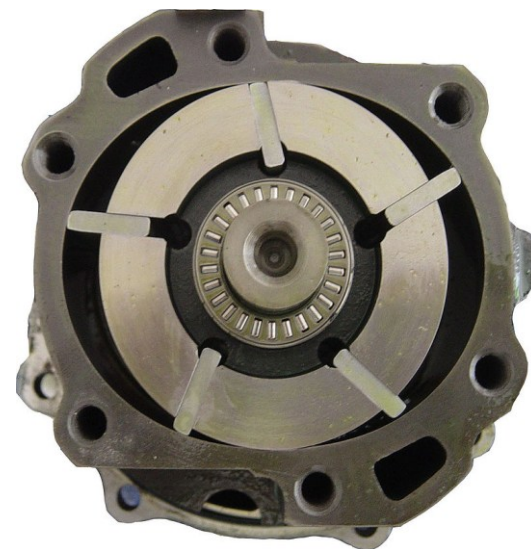
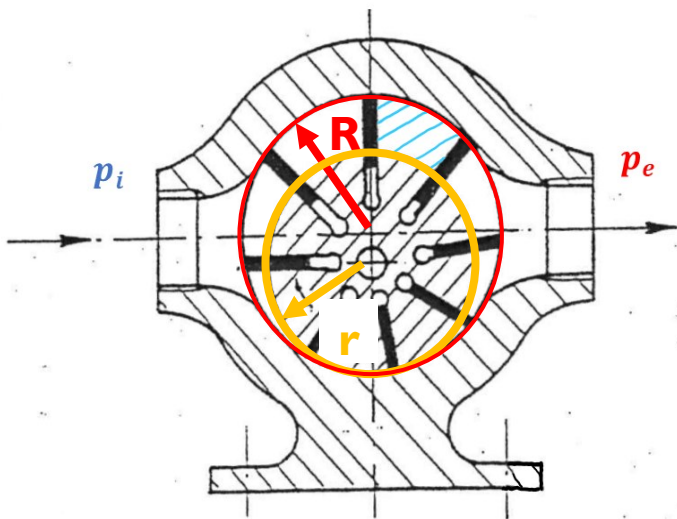
- diametro $D = 2R$
- lunghezza assiale B

al cui interno ruota un tamburo interno di diametro $d = 2r$ disposto eccentricamente all'interno della cassa



Pompe rotative a palette: **geometria**

- Il rotore (elemento cilindrico interno) presenta delle **scanalature radiali** in cui scorrono delle palette che si mantengono in contatto con le pareti interne della cassa, ostacolando il **riflusso** di portata dall'ambiente di mandata a quello di aspirazione
- Il movimento delle palette è dovuto a **molle elastiche interne** o **all'azione delle forze centrifughe**



Data una certa **geometria** quanta
PORTATA elabora la macchina?

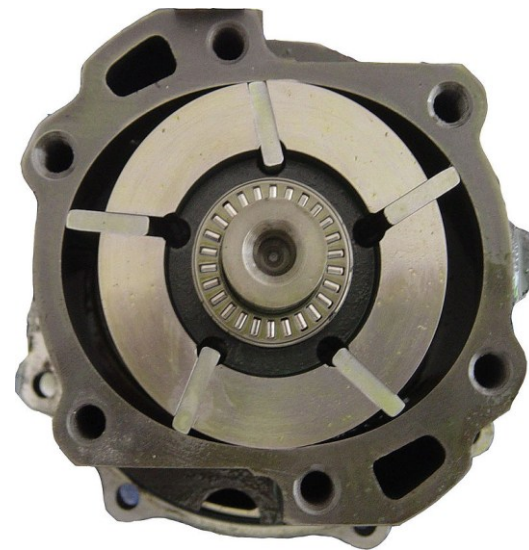
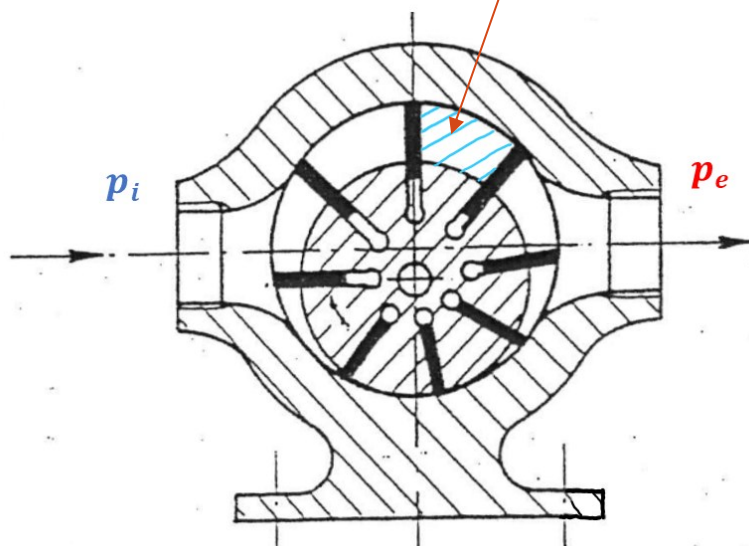
Pompe rotative a palette: **portata**

- La **portata elaborata** dalla pompa in **condizioni ideali** (assenza di fughe/trafilamenti) è:

$$Q_{vi} = Z \cdot V_{vano} \frac{n}{60}$$

Numeri di vani
scaricati in un giro

Volume del
singolo vano



Data una certa Q_{vi} di progetto, come si dimensiona la macchina?

Pompe rotative a palette: dimensionamento

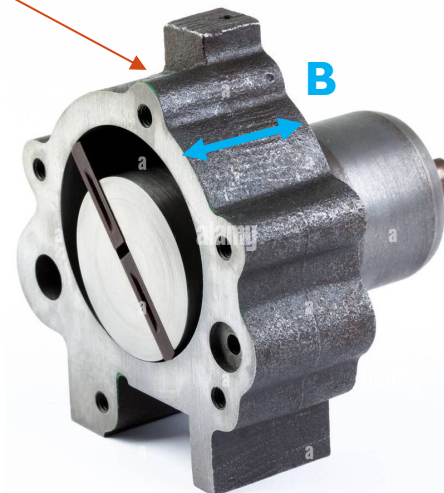
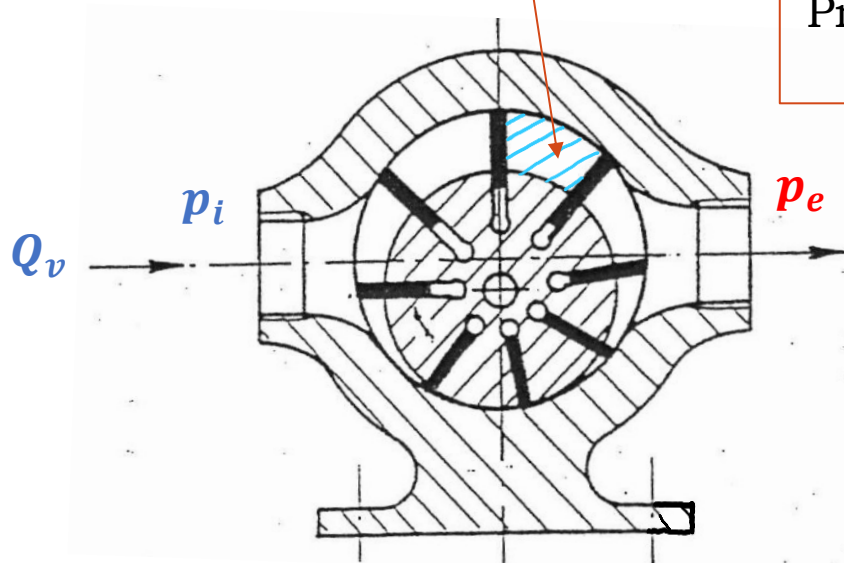
- Per **dimensionare** la macchina è necessario determinare la **cilindrata** V_g della pompa:

$$V_g = Z \cdot V_{vano} = Z \cdot (A_{vano} \cdot B)$$

Area racchiusa
tra le palette

Profondità
assiale

- Si devono quindi stabilire **correlazioni** tra la **portata** e le **dimensioni principali della macchina**



Pompe rotative a palette: dimensionamento

- L'area A_{vano} si può approssimare con la seguente relazione:

$$A_{vano} \approx \frac{\pi D}{Z} (D - d) - s(D - d)$$

$$\frac{\pi D}{Z}$$

$$D - d$$

Si tiene conto dello spessore s delle palette

- Il volume tra due palette è:

$$V_{vano} \approx A_{vano} B = \left[\frac{\pi D}{Z} (D - d) - s (D - d) \right] B$$

- Per tenere conto delle approssimazioni, si introduce un coefficiente k_v

$$V_{vano} = k_v \left[\frac{\pi D}{Z} (D - d) - s (D - d) \right] B$$

Pompe rotative a palette: dimensionamento

- Il volume generato per ogni giro, ossia la cilindrata della pompa, è:

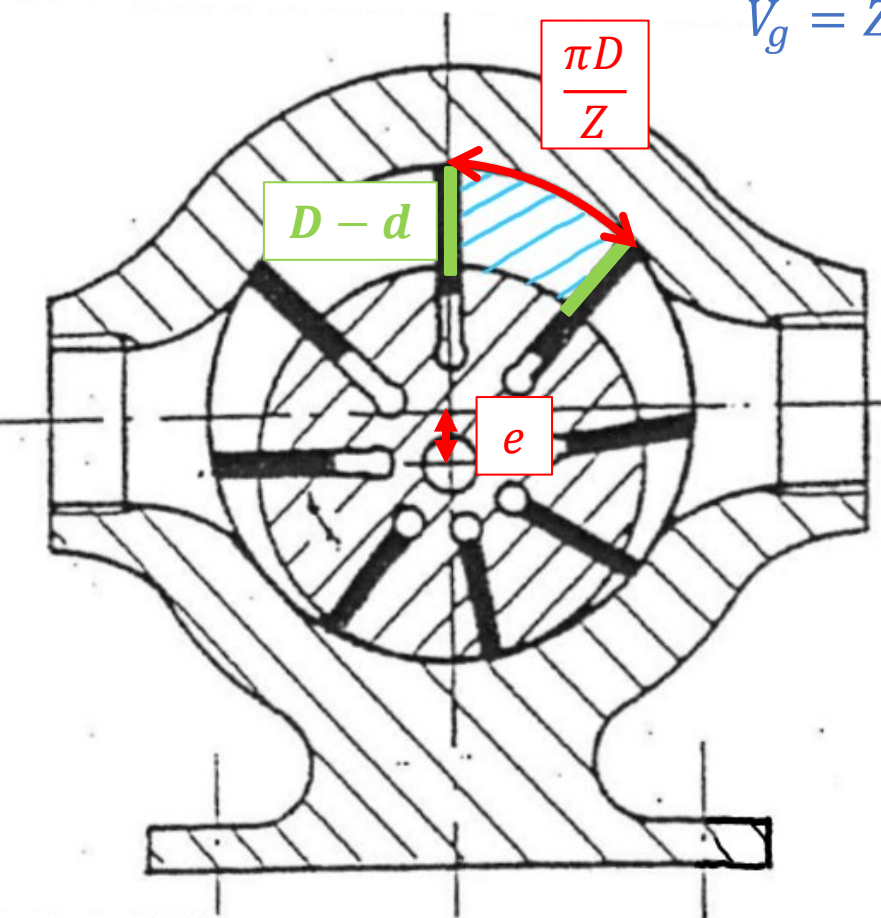
$$V_g = Z V_{vano} = Z k_v \left[\frac{\pi D}{Z} (D - d) - s (D - d) \right] B$$

$$= k_v [\pi D B (D - d) - s Z B (D - d)]$$

$$= k_v \pi D B (D - d) \left(1 - \frac{s Z}{\pi D} \right)$$

$$= k_v \pi D B 2 e \left(1 - \frac{s Z}{\pi D} \right)$$

coefficiente che tiene conto dell'ostruzione palare

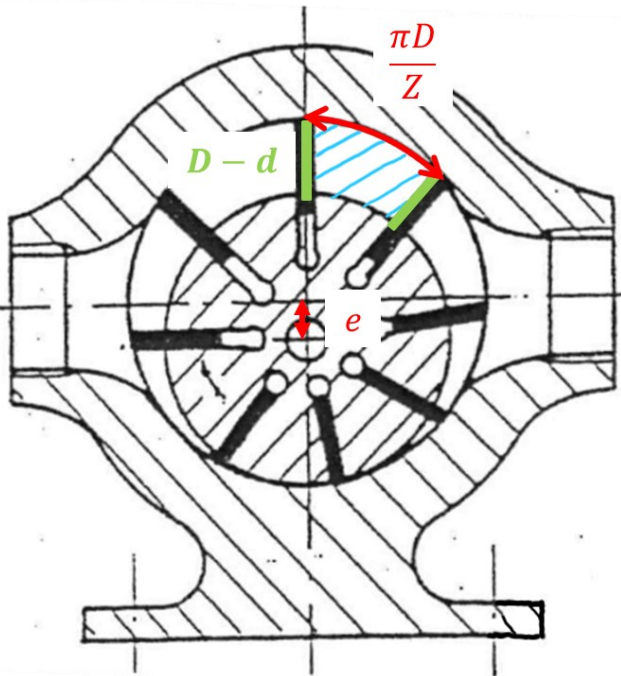


Pompe rotative a palette: dimensionamento

- La **portata** elaborata dalla pompa in **condizioni ideali** è quindi:

$$Q_{vi} = V_g \frac{n}{60} = k_v \pi D B 2 e \left(1 - \frac{s Z}{\pi D} \right) \frac{n}{60}$$

- A causa dei **trafilamenti di portata** Q_{vf} attraverso le tenute, la portata Q_v inviata alla mandata è minore di Q_{vi}



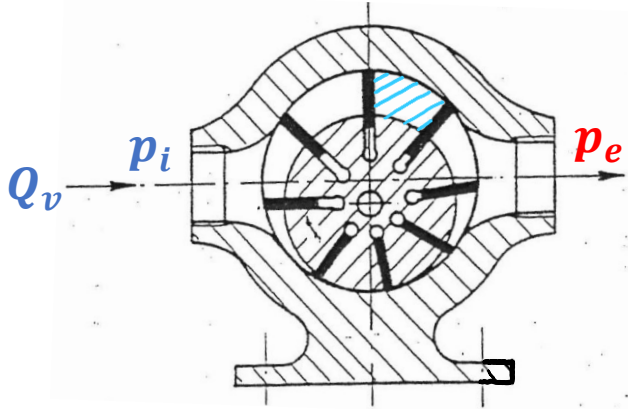
- Per tenere conto della portata di fuga Q_{vf} si utilizza il **rendimento volumetrico**:

$$\eta_v = \frac{Q_{vi} - Q_{vf}}{Q_{vi}} = \frac{Q_v}{Q_{vi}}$$

- La portata volumetrica che effettivamente fluisce alla mandata è quindi:

$$Q_v = \eta_v Q_{vi} = \eta_v k_v \pi D B 2 e \left(1 - \frac{s Z}{\pi D} \right) \frac{n}{60}$$

Pompe rotative a palette: **Funzionamento a vuoto**

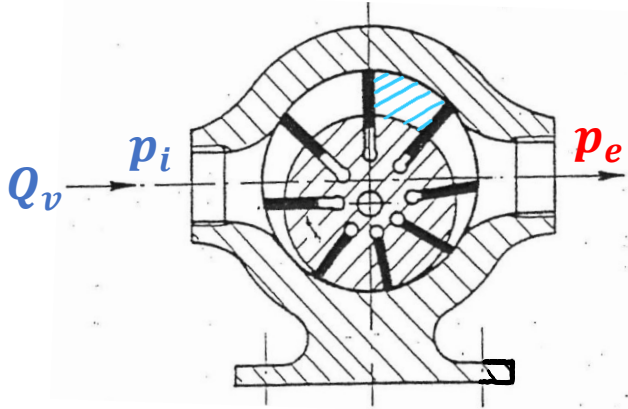


- Tutte le **pompe volumetriche**, in virtù del loro principio di funzionamento, continuano ad elaborare per un dato regime di rotazione sempre la **medesima portata** interna $Q_{vi} = Q_{vg} = Q_v / \eta_v$, indipendentemente dalla differenza di pressione $\Delta p = p_e - p_i$ tra gli ambienti di aspirazione e mandata
- La portata di trafilamento Q_{vf} invece dipende da Δp :

$$Q_{vf} = f(\Delta p = p_e - p_i)$$

Quando $\Delta p = p_e - p_i = 0$ (funzionamento a **vuoto**),
che portata elabora la pompa?

Pompe rotative a palette: **Funzionamento a vuoto**



- Quando $\Delta p = p_e - p_i = 0$ (non c'è alcuna variazione di pressione tra gli ambienti di aspirazione e mandata), si dice che **funziona a vuoto**
- La portata di trafilamento si annulla:

$$Q_{vf} = f(\Delta p = p_e - p_i = 0) = 0$$

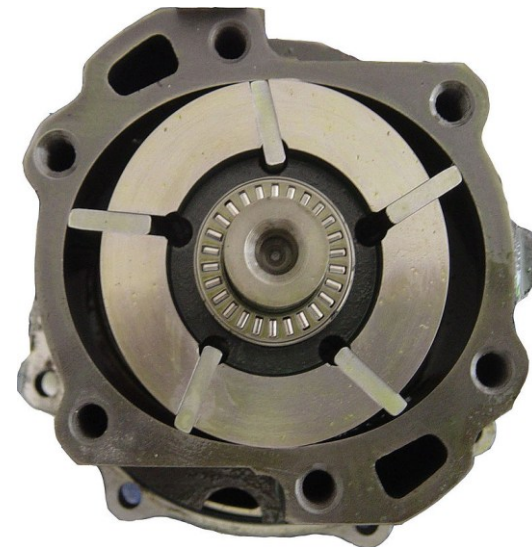
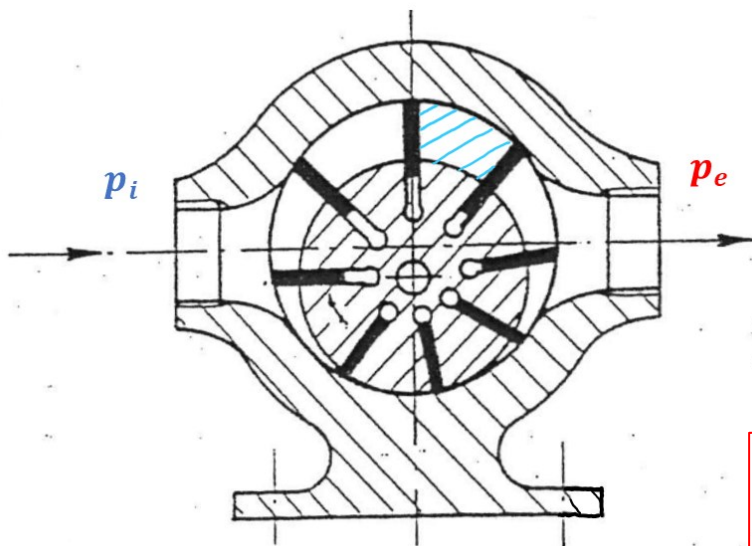
- ⇒ La pompa **trasferisce** alla mandata la **portata massima** Q_{vi} (è **nulla** la portata di trafilamento Q_{vf}) impegnando la minima potenza, quella necessaria per vincere le perdite meccaniche e idrauliche nella pompa
- La condizione di funzionamento a vuoto ($\Delta p = p_e - p_i = 0 \rightarrow \eta_v = 1$) può essere utilizzata per misurare sperimentalmente il coefficiente k_v
 - Nota la geometria, è sufficiente misurare la portata volumetrica $Q_{v,\Delta p=0}$ in questa condizione per determinare k_v :

$$Q_{v,\Delta p=0} = Q_{vi} = k_v \pi D B 2 e \left(1 - \frac{s Z}{\pi D} \right) \frac{n}{60}$$

Pompe rotative a palette: **portata**

- Si è trovata quindi una **correlazione** tra la **portata di progetto** e alcune **caratteristiche geometriche** della pompa:

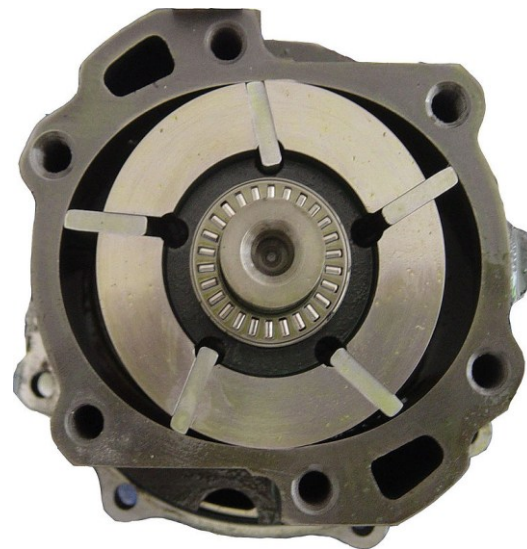
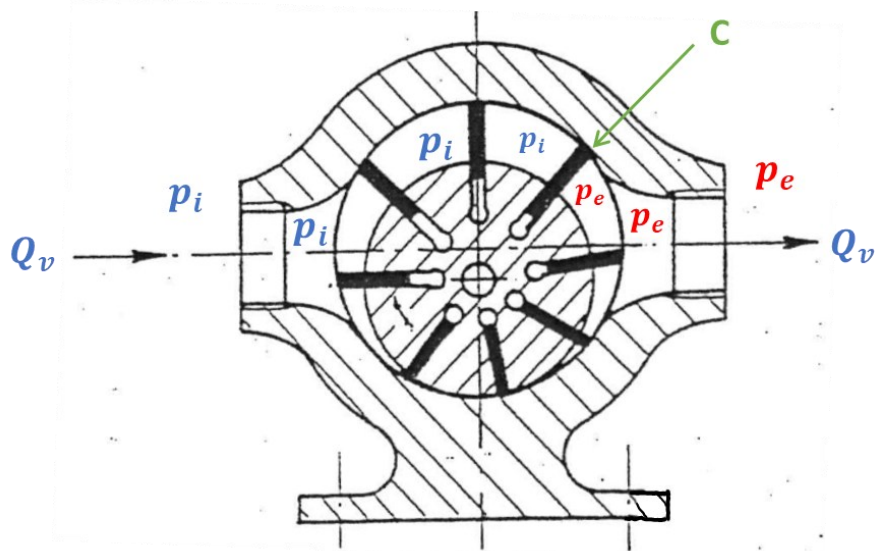
$$Q_v = \eta_v k_v \pi D B 2 e \left(1 - \frac{s Z}{\pi D} \right) \frac{n}{60}$$



Quali saranno però le **prestazioni** di questa pompa?

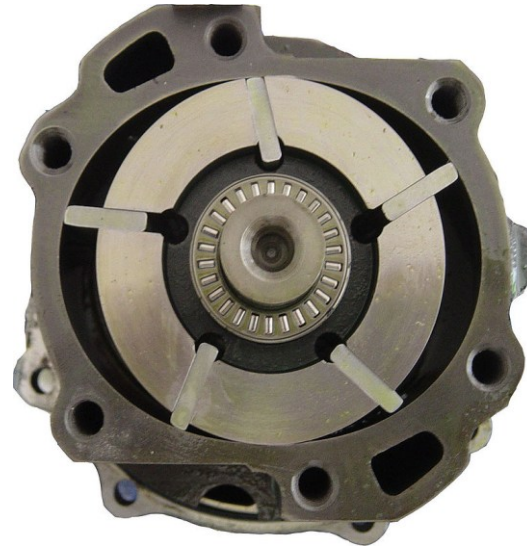
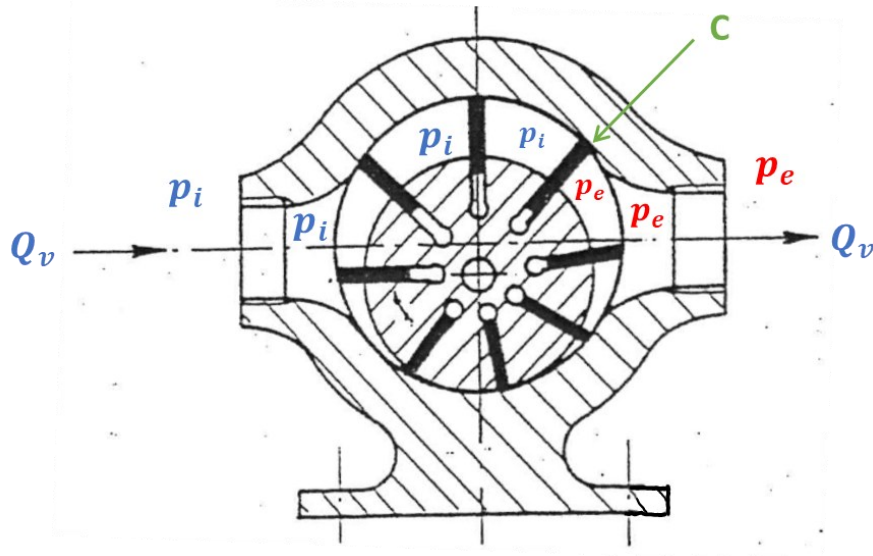
E' necessario trovare una nuova **correlazione!!**

Pompe rotative a palette: **potenza assorbita**



- Le pompe rotative hanno un ruolo **passivo** nel processo di compressione
- La potenza assorbita P_{alb} è legata al **momento** fornito alle palette per **trasferire** la portata Q_v dalla aspirazione alla mandata
- Per trasferire la portata Q_v , la palette **C** deve ricevere dal motore un momento tale da sopperire alla differenza di pressione $\Delta p = p_e - p_i$ che agisce sulla sua superficie

Pompe rotative a palette: **potenza assorbita**



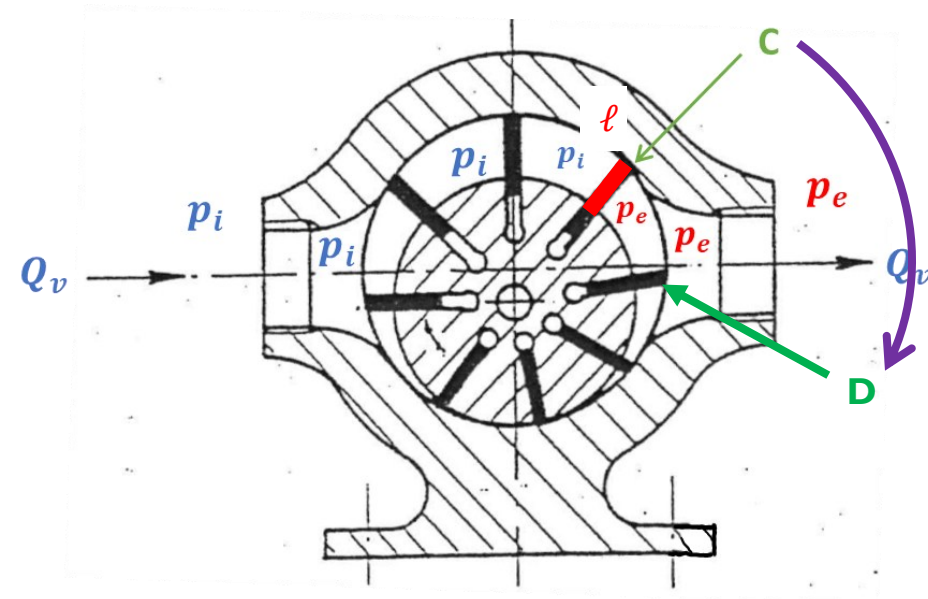
- Si deve **determinare** il **momento che le forze di pressione esercitano sulla paletta**
- Il momento resistente della macchina sarà uguale e contrario a tale momento delle forze di pressione
- Il **momento** delle forze di pressione si esercita sulla paletta **C** quando il vano che questa delimita è in comunicazione con la mandata

Pompe rotative a palette: **potenza assorbita**

- Il **lavoro** richiesto in condizioni ideali (macchina perfetta e fluido aviscoso) per trasferire alla mandata il **fluido** contenuto in un **singolo** volume V_{vano} è:

$$L_{vano_i} = F_{paletta} \cdot \text{Spostamento}_{paletta}$$

Arco di spostamento della paletta necessario per trasferire il volume alla mandata (dalla **posizione C** alla **posizione D**)



$$L_{vano_i} = F_{paletta} \frac{2\pi r}{Z}$$

$$F_{paletta} = (p_e - p_i) A_{paletta}$$



$$A_{paletta} = B \ell$$

Pompe rotative a palette: **potenza assorbita**

- Il **lavoro** richiesto in condizioni ideali (macchina perfetta e fluido aviscoso) per trasferire alla mandata il **fluido** contenuto in un **singolo** volume V_{vano} è:

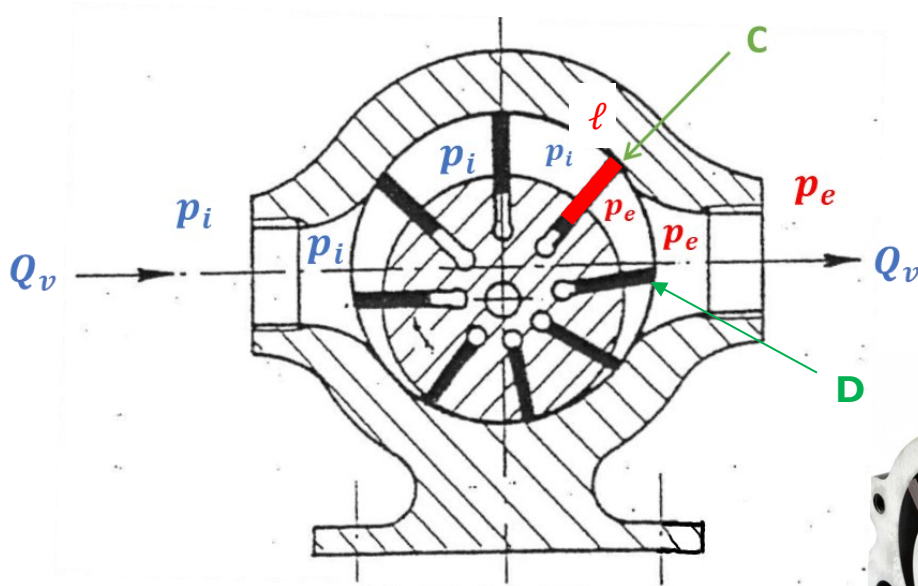
$$L_{vano_i} = (p_e - p_i) A_{paletta} \frac{2\pi r}{Z} = (p_e - p_i) B \ell \frac{2\pi r}{Z}$$

Cos'è?

$$A_{paletta} \cdot \frac{2\pi r}{Z} = B \ell \cdot \frac{2\pi r}{Z}$$

Il volume del vano V_{vano} !!

$$L_{vano_i} = (p_e - p_i) V_{vano}$$



Pompe rotative a palette: **potenza assorbita**

- Il **lavoro complessivo ideale** L_i richiesto in un giro dell'albero motore è:

$$L_i = L_{vano_i} Z = (p_e - p_i) V_{vano} Z \quad \left[\frac{\text{J}}{\text{giro}} \right]$$

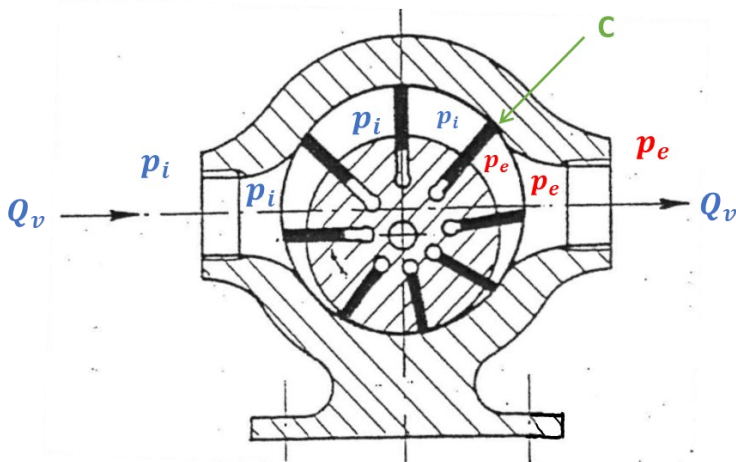
- La **potenza** $P_{alb,i}$ richiesta in **condizioni ideali** per il trasferimento della portata Q_{v_i} è pertanto:

$$P_{alb,i} = L_i \frac{n}{60} = (p_e - p_i) V_{vano} Z \frac{n}{60} =$$

$$= \left(\frac{p_e - p_i}{\rho} \right) \rho \boxed{V_{vano} Z \frac{n}{60}} =$$

Q_{v_i}

$$P_{alb,i} = \left(\frac{p_e - p_i}{\rho} \right) \rho Q_{v_i}$$



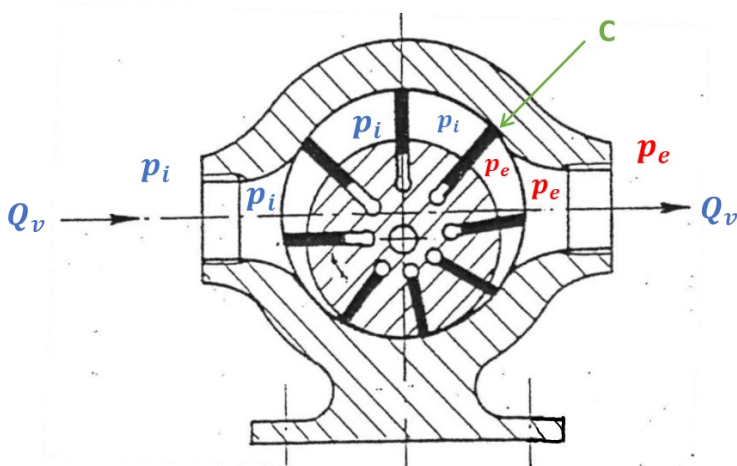
Pompe rotative a palette: **potenza assorbita**

$$P_{alb,i} = \left(\frac{p_e - p_i}{\rho} \right) \rho Q_{v_i}$$

Il **primo principio** considerava le pressioni totali. C'è un'incoerenza?

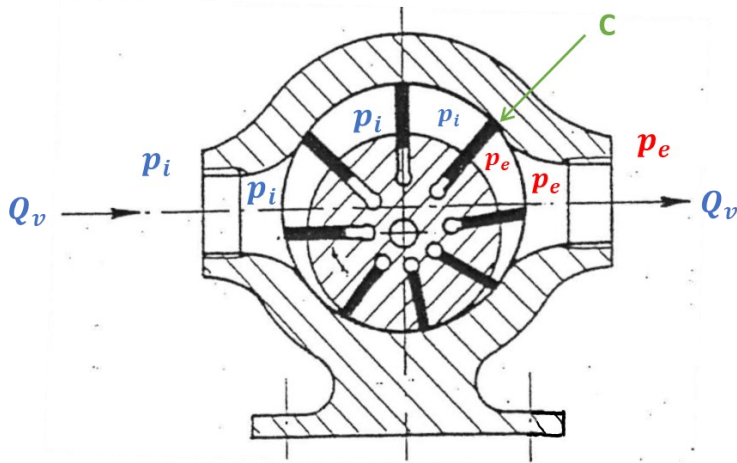
$$\left(\frac{p_e^0 - p_i^0}{\rho} \right) = \left(\frac{p_e - p_i}{\rho} \right) + \cancel{\frac{C_e^2 - C_i^2}{2}} + \cancel{z_e - z_i}$$

- Nelle pompe volumetriche le variazioni di energia cinetica $(C_e^2 - C_i^2)/2$ e il dislivello geodetico $z_e - z_i$ sono trascurabili rispetto alla variazione di pressione statica $(p_e - p_i)/\rho$ tra le sezioni di ingresso e uscita:



$$P_{alb,i} = \left(\frac{p_e^0 - p_i^0}{\rho} \right) \rho Q_{v_i}$$

Pompe rotative a palette: **potenza assorbita**



$$P_{alb,i} = \left(\frac{p_e^0 - p_i^0}{\rho} \right) \rho Q_{v_i} = (p_e^0 - p_i^0) Q_{v_i}$$

Che **perdite** si devono conteggiare per determinare la **potenza assorbita dalla pompa in condizioni reali**?

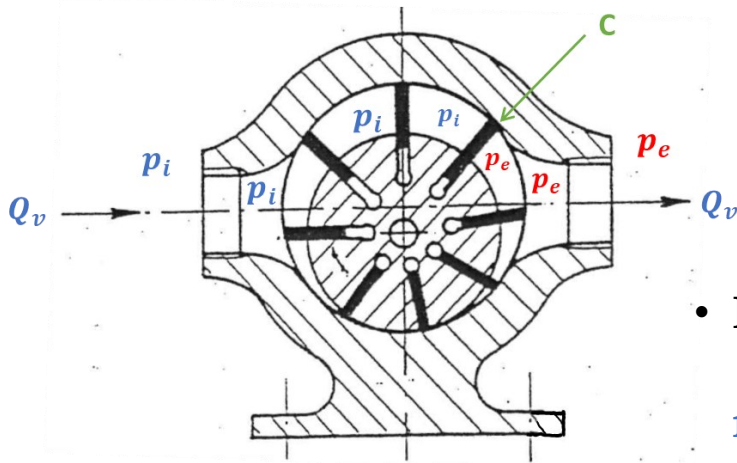
Le **perdite meccaniche e idrauliche** dovute alla realtà della macchina e del fluido operativo

$$P_{alb} = \frac{P_{alb,i}}{\eta_{id} \eta_m} = \frac{Q_{v_i} (p_e^0 - p_i^0)}{\eta_{id} \eta_m}$$

degradazione di **energia idraulica** in calore in seno al fluido

degradazione di **energia meccanica** in calore negli accoppiamenti cinematici tra albero e supporti

Pompe rotative a palette: **potenza assorbita**



$$P_{alb} = \frac{P_i}{\eta_{id} \eta_m} = \frac{Q_{vi} (p_e^0 - p_i^0)}{\eta_{id} \eta_m} = \frac{Q_v (p_e^0 - p_i^0)}{\eta_v \eta_{id} \eta_m}$$

η

- Nelle **macchine volumetriche** il rendimento idraulico η_{id} è comunemente **incluso** nel **rendimento meccanico** η_m :

$$\eta = \eta_v \eta_m$$

- Lo **scambio di energia** non dipende né dalla portata né dal regime di rotazione dell'albero motore, ma solo dalla **caratteristica resistente** dell'impianto
- Lo scambio di energia **non dipende** dalla **geometria** del rotore
- La **geometria del rotore** condiziona solo il volume di fluido trasferito dall'aspirazione alla mandata
- La **portata** varia linearmente con il numero di giri del motore

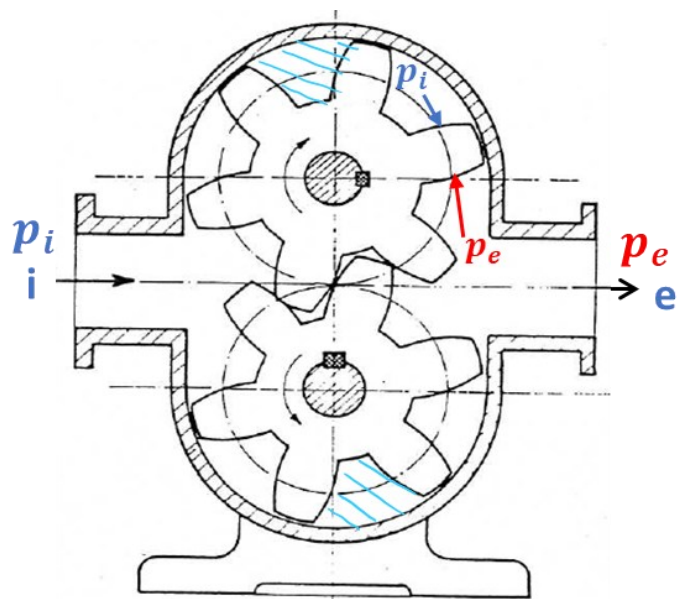


Pompe volumetriche rotative a Ingranaggi

Pompe rotative ad ingranaggi

Le pompe ad ingranaggi funzionano allo stesso modo??

SI'

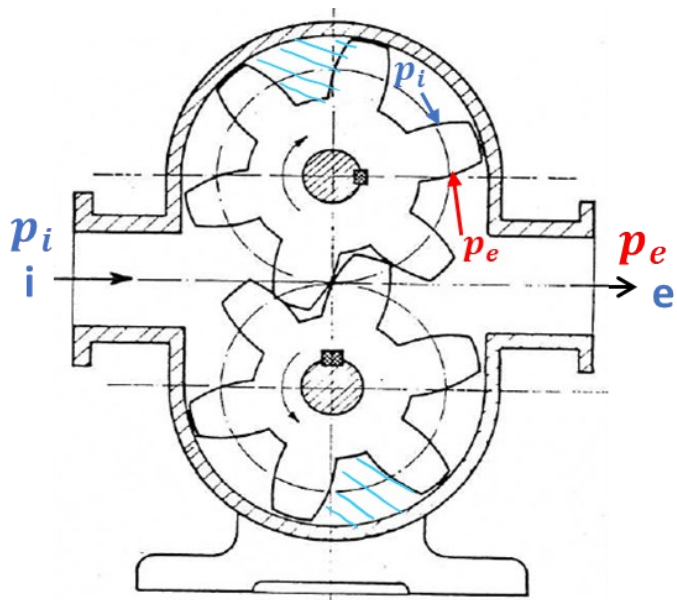


Pompa a ingranaggi

- In luogo delle **palette** ci sono due **ingranaggi**, uno motore l'altro condotto, aventi lo stesso numero di denti
- Nel **vano tra due denti** di ciascuna ruota dentata e la cassa viene captato all'aspirazione un volume di fluido che viene trasferito successivamente alla mandata contro la pressione resistente p_e

Pompe rotative ad ingranaggi

- La **cilindrata** di una pompa ad ingranaggi è data dal **volume** dei **vani compresi** tra le due **ruote** dentate e la **cassa**

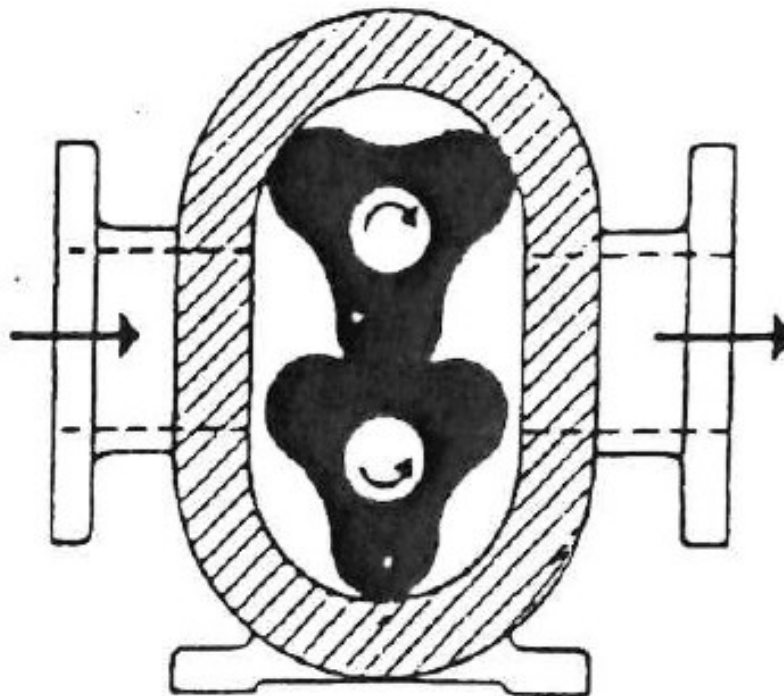


Pompa a ingranaggi

- In prima approssimazione, la cilindrata può essere approssimata dal **volume** della **corona dentata** di una delle ruote
- Per quanto attiene al resto: potenza assorbita, rendimenti etc. **valgono** le considerazioni già svolte per le pompe a palette

Pompe rotative a lobi

- In modo analogo funzionano anche le [pompe rotative a lobi](#)

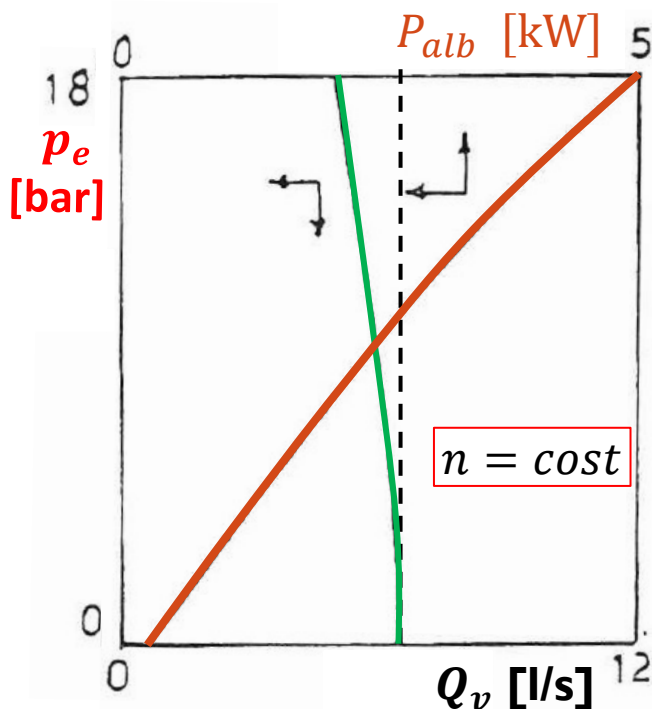


Pompa rotativa a tre lobi



Curve caratteristiche

Curve caratteristiche



- Lo **scambio energetico** non dipende dalla portata ma è imposto dalla caratteristica resistente dell'impianto in cui la macchina è inserita:

$$gh = \left(\frac{p_e - p_i}{\rho} \right)$$

- La **potenza all'albero**:

$$P_{alb} = \frac{Q_v (p_e^0 - p_i^0)}{\eta_v \eta_{id} \eta_m}$$

aumenta in modo pressoché lineare con lo scambio energetico

- All'aumentare dello scambio energetico infatti il rendimento volumetrico η_v **diminuisce** progressivamente a causa dell'aumento della portata di fuga $Q_{v,f}$



Campi di impiego e condizioni di esercizio

Campi di impiego e condizioni di esercizio

- Le pompe volumetriche rotative operano con velocità di rotazione n non superiori a circa 1000 giri/min per contenere il rumore e le vibrazioni dovute al carattere pulsante della portata

Si vedrà che le pompe volumetriche alternative raramente superano il centinaio di giri/min per il rischio di cavitazione e a fenomeni dinamici pericolosi per l'integrità strutturale dell'impianto

- Le pompe volumetriche sono impiegate quando le portate sono piccole a fronte della prevalenza
- Si fa ancora riferimento alle macchine volumetriche quando è necessario che la portata e quindi la velocità del fluido alla mandata debbano rimanere costanti al variare della pressione di esercizio
- Devono inoltre essere dotate di una valvola di sicurezza per impedire che la pressione raggiunga valori inammissibili per la resistenza strutturale delle condotte qualora si verificino ostruzioni accidentali nell'impianto



Domande, Curiosità, Dubbi, Perplessità?

PROF. ING. ALBERTO BENATO, PH.D.

ASSOCIATE PROFESSOR

TURBOMACHINERY & ENERGY SYSTEMS GROUP

DEPARTMENT OF INDUSTRIAL ENGINEERING - UNIVERSITY OF PADOVA
VIA VENEZIA 1 - 35131 - PADOVA
BLDG. EX DIM - 5TH FLOOR - ROOM 19

TEL. 049 827 6752

MAIL: ALBERTO.BENATO@UNIPD.IT

WEBSITE: RESEARCH.DII.UNIPD.IT/TES/

