

## P O M P E

Sono macchine IDRAULICHE OPERATRICI. Loro compito è quello di **trasferire l'energia meccanica** di cui dispongono in energia idraulica. Queste macchine **cedono al fluido incompressibile** che le attraversa energia di pressione e/o energia cinetica.

Una qualsiasi pompa è costituita da una parte fissa e da una parte mobile che può avere moto rotatorio o moto rettilineo alternato. La parte mobile della pompa ha la funzione di trasferire l'energia al fluido.

### CLASSIFICAZIONE

In base a come trasmettono l'energia al fluido, si distinguono vari tipi di pompe.

**Pompe alternative** (o a STANTUFFO): sono caratterizzate dal moto rettilineo alternato di un organo mobile (stantuffo); lo stantuffo esercitando una pressione sul fluido gli trasferisce l'energia.

**Pompe centrifughe** (TURBOPOMPE): sono caratterizzate dal moto rotatorio veloce di un organo mobile (girante); la girante per effetto centrifugo trasferisce energia al fluido.

**Pompe rotative**: sono caratterizzate dal moto rotatorio lento di organi mobili (ruote dentate, lobi); il trasferimento dell'energia avviene esercitando una pressione sul fluido, tipo quelle a stantuffo.

### POMPA E IMPIANTO

Una delle principali applicazioni delle pompe è quella di sollevare una portata di fluido da un serbatoio a valle a un serbatoio a monte, posto ad un'altezza maggiore.

Le caratteristiche principali di una pompa sono:

- ↳ la **portata**, cioè la quantità di fluido che nell'unità di tempo attraversa la pompa; nel caso delle pompe si utilizza quasi sempre la portata volumetrica;
- ↳ la **prevalenza manometrica**, cioè l'energia effettiva  $H_m$  che la pompa cede all'unità di peso del fluido.

Per un impianto generico, il cui schema è rappresentato in figura, si adotta la seguente terminologia:

$H_g$  è la PREVALENZA GEODETICA

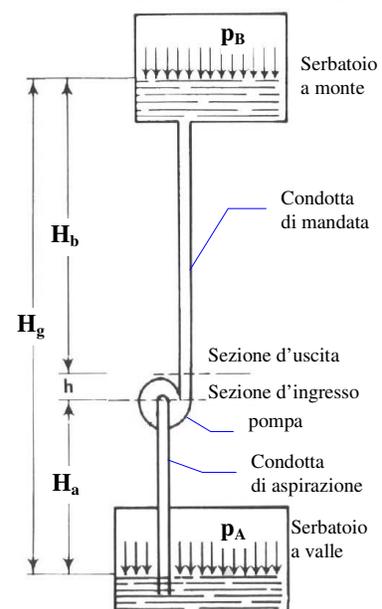
$H_a$  è la PREVALENZA della CONDOTTA DI ASPIRAZIONE

$H_b$  è la PREVALENZA della CONDOTTA DI MANDATA

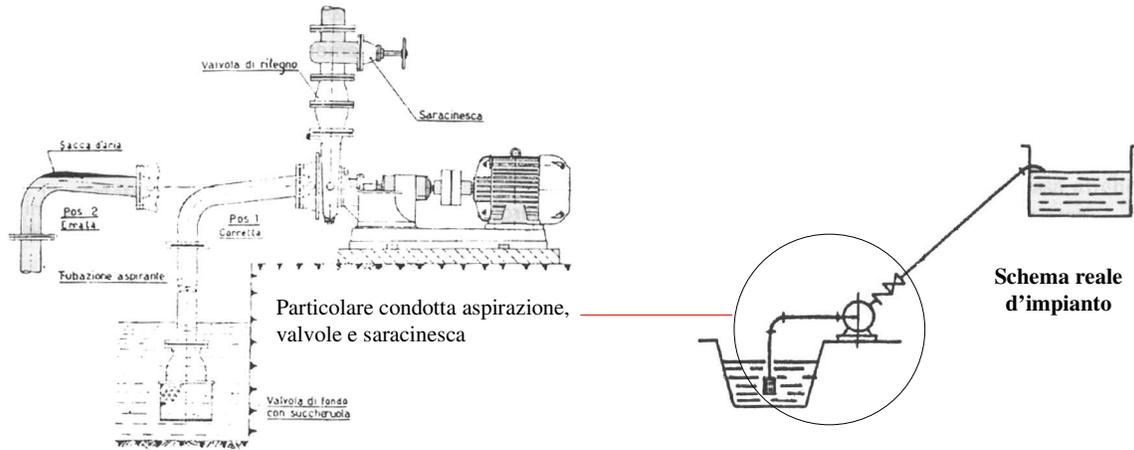
$h$  è il DISLIVELLO tra le sezioni d'ingresso e d'uscita della pompa

$p_A$  è la PRESSIONE sul SERBATOIO A VALLE

$p_B$  è la PRESSIONE sul SERBATOIO A MONTE



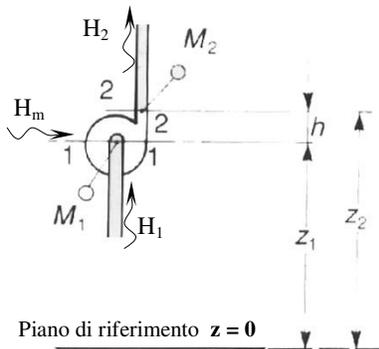
Uno schema reale di un impianto di sollevamento è rappresentato nella sottostante figura. È riportato anche il particolare della condotta di aspirazione, cui va dedicata particolare attenzione nella progettazione per permettere sia il regolare funzionamento dell'impianto, sia le operazioni di eventuale regolazione e manutenzione.



### PREVALENZA MANOMETRICA

La prevalenza manometrica è l'energia effettiva che la pompa cede al fluido, quindi applicando il teorema di Bernoulli tra le sezioni d'ingresso e d'uscita della pompa, trascurando al momento le perdite nella pompa, per l'unità di peso del fluido si può dire che

ENERGIA ENTRANTE + ENERGIA CEDUTA DALLA POMPA = ENERGIA USCENTE



o in simboli

$$H_1 + H_m = H_2 \quad \text{ovvero}$$

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + H_m = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g}$$

da cui si calcola

$$H_m = (z_2 - z_1) + \frac{p_2 - p_1}{\gamma} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot g}$$

Piano di riferimento  $z = 0$

Nel caso di tubazioni di aspirazione e di mandata di uguale diametro, per il moto stazionario, si ha  $v_2 = v_1$ , pertanto

$$H_m = h + \frac{p_2 - p_1}{\gamma} \cong \frac{p_2 - p_1}{\gamma} \quad \text{ritenendo } h \text{ trascurabile rispetto all'altro termine}$$

Quindi la prevalenza manometrica può essere misurata utilizzando due manometri posti all'ingresso e all'uscita della pompa.

Affinché la pompa aspiri il fluido dal serbatoio a valle, nella sua sezione d'ingresso vi deve essere una DEPRESSIONE, cioè una **pressione relativa negativa**.

### ESEMPIO: calcolo della prevalenza manometrica con l'uso di manometri

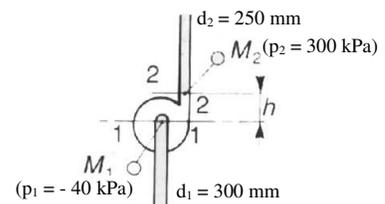
Sul manometro  $M_1$  (VACUOMETRO) si legge  $p_1 = -40 \text{ kPa}$

sul manometro  $M_2$  si legge  $p_2 = 300 \text{ kPa}$

la portata vale  $Q = 0,1 \text{ m}^3/\text{s}$

il diametro della condotta di aspirazione vale  $d_1 = 300 \text{ mm}$

il diametro della condotta di mandata vale  $d_2 = 250 \text{ mm}$



la sezione d'uscita della pompa (BOCCA DI MANDATA) è posta ad un'altezza  $h = 1 \text{ m}$  al di sopra della sezione d'ingresso della pompa (BOCCA DI ASPIRAZIONE).

$$H_m = h + \frac{p_2 - p_1}{\gamma} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot g}$$

Dalla definizione di portata volumetrica

$$Q = A_1 \cdot v_1 \quad \text{si calcola} \quad v_1 = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_1^2} = \frac{4 \times 0,1 \text{ m}^3/\text{s}}{3,14 \times (0,3 \text{ m})^2} = 1,41 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\text{Analogamente} \quad v_2 = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_2^2} = \frac{4 \times 0,1 \text{ m}^3/\text{s}}{3,14 \times (0,25 \text{ m})^2} = 2,04 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Quindi

$$H_m = h + \frac{p_2 - p_1}{\gamma} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot g} = 1 \text{ m} + \frac{300000 \text{ Pa} - (-40000 \text{ Pa})}{9810 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}} + \frac{(2,04 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2 - (1,41 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{2 \times 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} =$$

$$= 1 \text{ m} + 34,66 \text{ m} + 0,11 \text{ m}$$

### Commento

Come si può vedere il termine che ha peso maggiore nel valore della prevalenza manometrica è proprio  $\frac{p_2 - p_1}{\gamma}$ , molto più grande degli altri due termini, in particolare del termine  $\frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot g}$ .

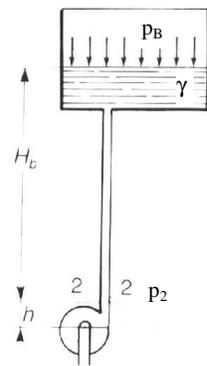
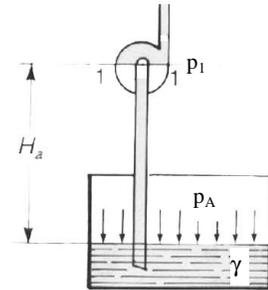
Per questo motivo nei calcoli tecnici si assume l'espressione approssimata  $H_m \cong \frac{p_2 - p_1}{\gamma}$

In **FASE DI PROGETTO** l'impianto non è realizzato, pertanto le pressioni  $p_2$  e  $p_1$  non possono essere rilevate coi manometri. Allora si determinano in modo indiretto, noti i parametri di progetto dell'impianto che sono:

- il dislivello tra i serbatoi:  $H_g$
- la pressione nel serbatoio a valle:  $p_A$
- la pressione nel serbatoio a monte:  $p_B$

Considerando il serbatoio a valle, per le pressioni si può scrivere

$$p_1 + \gamma \cdot H_a = p_A \quad \text{da cui si calcola} \quad p_1 = p_A - \gamma \cdot H_a$$



Considerando il serbatoio a monte, per le pressioni si può scrivere

$$p_B + \gamma \cdot H_b = p_2$$

Sostituendo le espressioni di  $p_2$  e  $p_1$  in quella della prevalenza manometrica si ottiene

$$H_m = h + \frac{p_2 - p_1}{\gamma} = h + \frac{p_B + \gamma \cdot H_b - (p_A - \gamma \cdot H_a)}{\gamma}$$

$$H_m = h + \frac{p_B}{\gamma} + H_b - \frac{p_A}{\gamma} + H_a = h + H_b + H_a + \frac{p_B - p_A}{\gamma} \quad \text{ma essendo} \quad h + H_b + H_a = H_g$$

In definitiva si ottiene  $H_m = H_g + \frac{p_B - p_A}{\gamma}$

Considerando anche le PERDITE IN TUTTA LA CONDOTTA  $\sum Y_C$  (**aspirazione + mandata**) si ottiene l'espressione definitiva, generale e completa per i casi reali

$$H_m = H_g + \frac{p_B - p_A}{\gamma} + \sum Y_C$$

Da questa si possono derivare tutti i casi particolari.

- ✓ Caso in cui i **serbatoi** sono **aperti in atmosfera**  $p_B = p_A = 0$   
 $H_m = H_g + \sum Y_C$  la prevalenza è data dalla somma del dislivello tra i serbatoi e delle perdite
- ✓ Caso in cui i **serbatoi** sono **aperti in atmosfera ed è nullo il dislivello**  
 (POMPE DI CIRCOLAZIONE)  $p_B = p_A = 0$   $H_g = 0$   
 $H_m = \sum Y_C$  la prevalenza è data dalla somma delle perdite nella tubazione,  
 cioè la pompa ha la sola funzione di vincere le resistenze dovute alle  
 perdite distribuite e concentrate che il fluido incontra nel percorrere la  
 condotta.

#### PREVALENZA TOTALE

Aggiungendo alla prevalenza manometrica le perdite di carico  $\sum Y_p$  che si manifestano nei condotti all'interno della pompa si ottiene

$$H_t = H_m + \sum Y_p \quad \text{PREVALENZA TOTALE}$$

#### RENDIMENTI

Per le pompe e il relativo impianto, per tenere conto delle perdite di energia si introducono i **rendimenti**: della CONDOTTA, IDRAULICO, VOLUMETRICO E MECCANICO

- ⇒ Il RENDIMENTO DELLA CONDOTTA  $\eta_C$  che quantifica le perdite di energia che avvengono nella condotta di aspirazione e di mandata (**perdite distribuite + concentrate**)

$$\eta_C = \frac{H_g}{H_g + \sum Y_C} < 1$$

- ⇒ Il RENDIMENTO DELLA POMPA  $\eta_P$  che quantifica tutte le perdite di energia che avvengono all'interno della pompa. Questo rendimento è dato dal prodotto dei rendimenti parziali ed assume valori variabili da 0,5 a 0,86 andando dalle piccole alle grandi pompe

$$\eta_P = \eta_i \cdot \eta_v \cdot \eta_m \quad \text{con} \quad \begin{cases} \eta_i = \text{rendimento idraulico} \\ \eta_v = \text{rendimento volumetrico} \\ \eta_m = \text{rendimento meccanico} \end{cases}$$

Il **rendimento idraulico** quantifica le perdite di energia che subisce il fluido nell'attraversare i condotti che si trovano all'interno della pompa

$$\eta_i = \frac{H_m}{H_m + \sum Y_p} = \frac{H_m}{H_t} < 1$$

Il valore di  $\eta_i = 0,70 \div 0,90$  (valori massimi quando sono rispettate le condizioni di max rendimento)

Il **rendimento volumetrico** quantifica le perdite dovute al fatto che la portata nella condotta di mandata  $Q$  è minore di quella aspirata  $Q + q$ ;  $q$  è la portata persa a causa dei giochi tra girante e carcassa della pompa

$$\eta_v = \frac{Q}{Q + q} < 1 \quad \eta_v = 0,90 \div 0,96$$

Il **rendimento meccanico** quantifica le perdite di tipo meccanico (attriti fra organi in movimento) all'interno della pompa

$$\eta_m = \frac{P_{\text{disponibile sull'albero}}}{P_{\text{disponibile}} + P_{\text{persa per attriti}}} = \frac{P_d}{P_d + P_p} < 1 \quad \eta_m = 0,88 \div 0,96$$

Il prodotto tra il rendimento della condotta e quello della pompa rappresenta il rendimento dell'impianto

$$\eta_I = \eta_C \cdot \eta_P \quad \text{RENDIMENTO IMPIANTO}$$

*POTENZA*

La **POTENZA TEORICA** per sollevare la massa  $M$  di fluido tra due serbatoi posti a un dislivello  $H_g$  vale:

$$P = \frac{L}{t} = \frac{M \cdot g \cdot H_g}{t} = Q_M \cdot g \cdot H_g = \rho \cdot Q \cdot g \cdot H_g \quad (\text{W})$$

In realtà la pompa deve fare un lavoro maggiore per tenere conto della perdite nella condotta  $\sum Y_C$  e dell'eventuale carico dovuto alle pressioni nei serbatoi a valle e a monte  $\frac{P_B - P_A}{\gamma}$ , pertanto il dislivello che il fluido deve effettivamente superare vale:

$$H_g + \sum Y_C + \frac{P_B - P_A}{\gamma} = H_m \quad \text{che è proprio la PREVALENZA MANOMETRICA}$$

Per quanto detto, la **POTENZA UTILE**  $P_u$  (o IDRAULICA) della pompa, cioè la potenza che la macchina somministra al fluido vale

$$P_u = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_m \quad (\text{W}) \quad \text{oppure} \quad P_u = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H_m}{1000} \quad (\text{kW})$$

Poiché la pompa ha un suo rendimento, per le perdite viste in precedenza, essa assorbe una potenza maggiore pari a

$$P_a = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H_m}{1000 \cdot \eta_p} \quad (\text{kW}) \quad \text{POTENZA ASSORBITA dalla pompa o POTENZA MECCANICA}$$

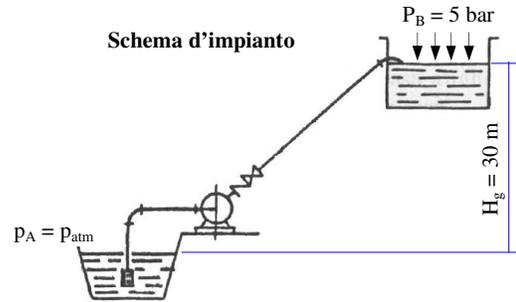
Confrontando le espressioni della potenza utile e di quella assorbita si può anche scrivere:

$$\eta_p = \frac{P_u}{P_a} \quad \text{RENDIMENTO POMPA}$$

ESEMPIO: *calcolo della potenza di una pompa in un impianto*

In un impianto di sollevamento per **acqua** sono noti

- Il dislivello geodetico tra i due serbatoi  $H_g = 30$  m
- La pressione sul serbatoio a valle  $p_A = p_{atm}$
- La pressione sul serbatoio a monte  $p_B = 5$  bar
- La lunghezza della condotta  $L = 40$  m
- Il diametro della condotta  $d = 200$  mm
- La velocità del liquido nella condotta  $v = 1,5$  m/s
- La somma delle perdite concentrate dovute a valvola di fondo, valvola di non ritorno, saracinesca di regolazione, cambi di direzione della condotta  $\sum y_{concentrate} = 4$  m



- Determinare la **potenza assorbita dalla pompa**, ipotizzando per essa un rendimento di 0,85, e la **potenza trasmessa al fluido**.

La potenza assorbita dalla pompa per sollevare il liquido dal serbatoio a valle al serbatoio a monte si calcola con la relazione

$$P_a = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H_m}{1000 \cdot \eta_p} \quad (\text{kW}) \quad \text{per cui occorre determinare i valori di } Q \text{ e di } H_m$$

*Calcolo della portata*

Supponendo il moto stazionario, dall'equazione di continuità, noto il diametro della condotta, si

calcola 
$$Q = \cos t = A \cdot v = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot v = \frac{3,14 \times (0,2 \text{ m})^2}{4} \times 1,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 0,0471 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

*Calcolo della prevalenza manometrica*

La prevalenza manometrica, cioè l'energia per unità di peso che effettivamente la pompa cede al fluido, vale nel caso generale:

$$H_m = H_g + \frac{p_B - p_A}{\gamma} + \sum Y_C \quad \text{con} \quad \begin{cases} H_g = 30 \text{ m} \\ \frac{p_B - p_A}{\gamma} = \frac{50000 \text{ Pa} - 101325 \text{ Pa}}{9810 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}} = 40,64 \text{ m} \\ \sum Y_C = Y_{distribuite} + \sum y_{concentrate} \\ Y_{distribuite} = \beta \cdot \frac{Q^2}{d^5} \cdot L = 0,002 \times \frac{(0,0471)^2}{(0,2)^5} \times 40 = 0,55 \text{ m} \\ \sum Y_C = 0,55 + 4 = 4,55 \text{ m} \end{cases}$$

Pertanto 
$$H_m = 30 \text{ m} + 40,65 \text{ m} + 4,55 \text{ m} = 75,19 \text{ m}$$

*Calcolo della potenza assorbita*

La potenza che la pompa assorbe dal motore che l'azione vale:

$$P_a = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H_m}{1000 \cdot \eta_p} = \frac{9810 \times 0,041 \times 75,19}{1000 \times 0,85} = 40,87 \text{ kW}$$

*Calcolo della potenza utile (o idraulica)*

La potenza che la pompa somministra o cede effettivamente al fluido è minore di quella assorbita, infatti parte di questa potenza (il **15%**) viene dissipata nella pompa per le perdite di natura idraulica, volumetrica e meccanica. Quindi la potenza utile vale:

$$P_u = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H_m}{1000} = \frac{9810 \times 0,041 \times 75,19}{1000} = 34,74 \text{ kW}$$