



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



Dipartimento
di Ingegneria Industriale

La cavitazione

Corso di Macchine 1

Agenda

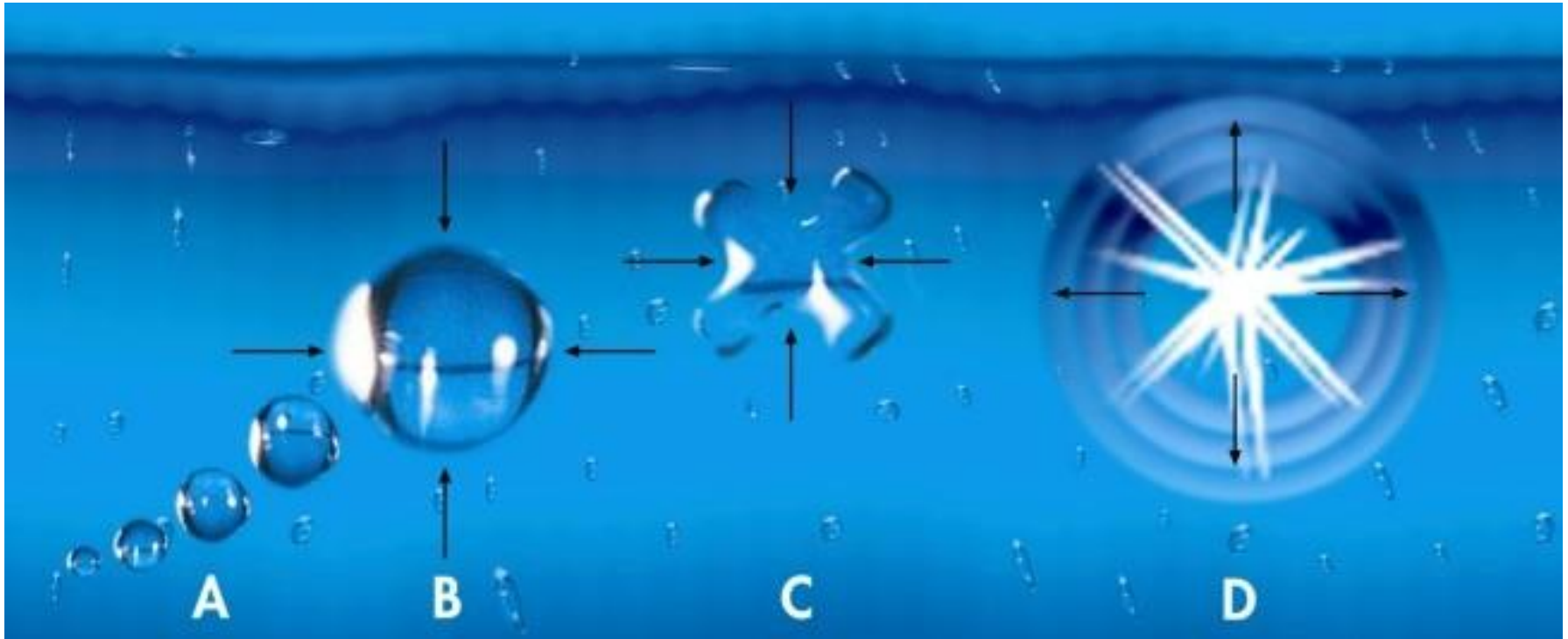
- ▶ Il fenomeno della cavitazione
- ▶ Valutazione del comportamento a cavitazione
 - ▶ Secondo il costruttore
 - ▶ Secondo l'utilizzatore
 - ▶ Esercizi applicativi
 - ▶ Secondo il progettista



Il fenomeno della Cavitazione

Il fenomeno della cavitazione

- Una volta generate, le bolle fluiscono con la corrente fluida principale
- Quando arrivano in una zona a pressione più elevata, il vapore in esse racchiuso condensa improvvisamente e le bolle implodono improvvisamente generando onde di pressione



La cavitazione

- Il fenomeno della cavitazione può essere analizzato da tre diversi punti di vista:
 - Costruttore
 - Utilizzatore
 - Progettista
- Il parametro che consente di caratterizzare il comportamento a cavitazione di una macchina è il:

Net Positive Suction Head (NPSH)

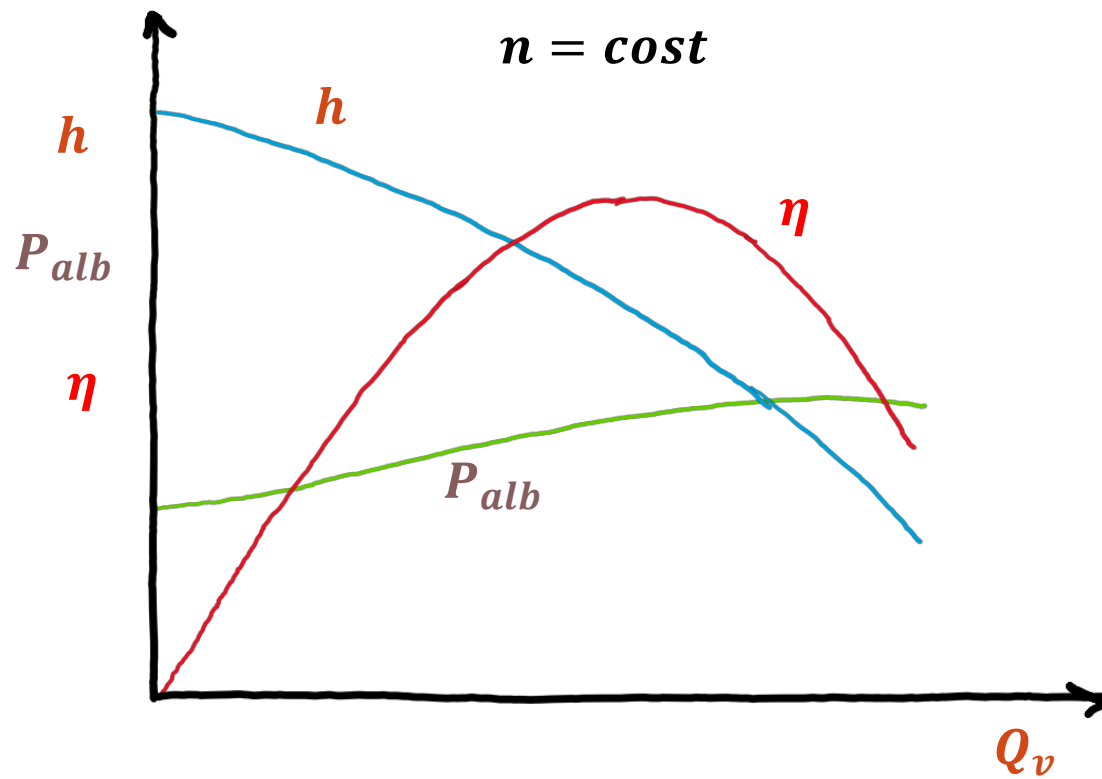
$$NPSH = \frac{p_i - p_v}{\rho g} + \frac{c_i^2}{2g}$$



La Cavitazione secondo il COSTRUTTORE

La cavitazione secondo il costruttore

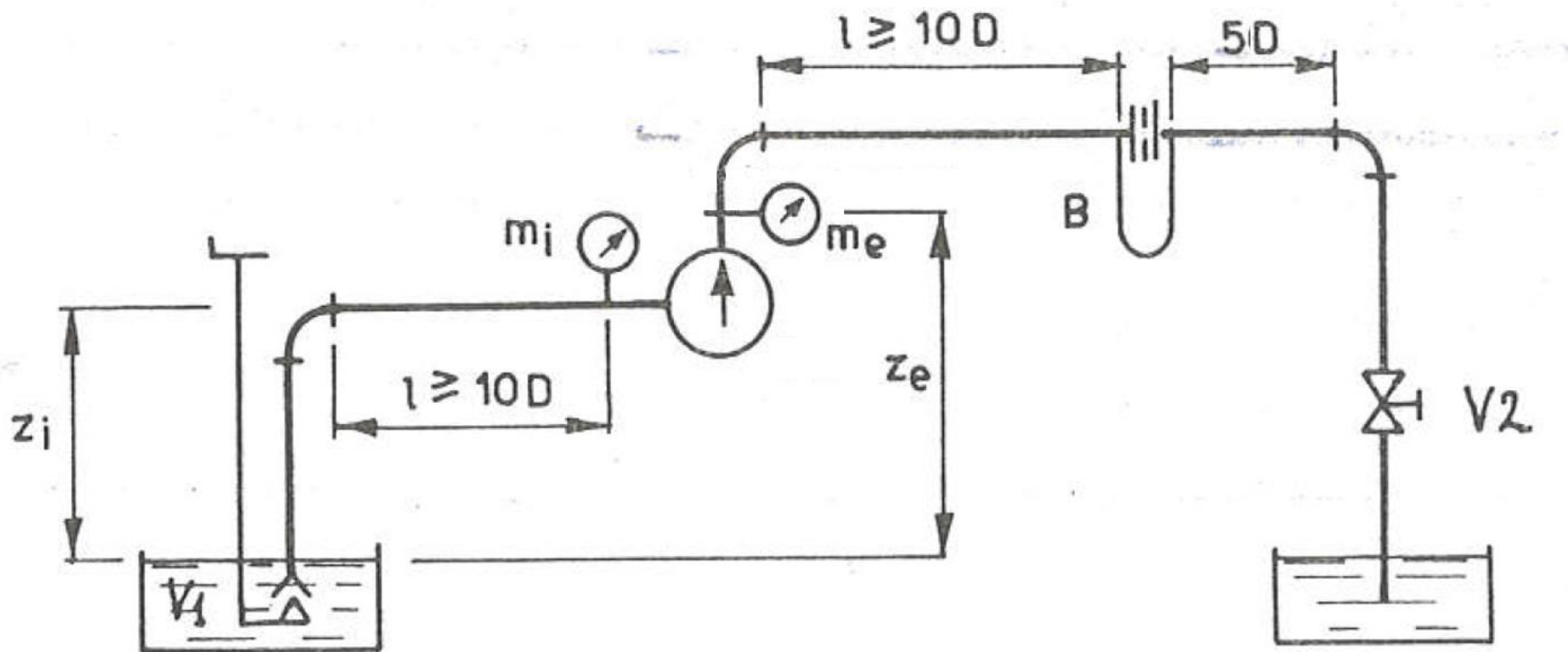
- Il collaudo di una pompa consente di determinare le curve caratteristiche delle prestazioni



E per la cavitazione??

Si può rappresentare il comportamento a cavitazione tramite l'**NPSH!!!**

La cavitazione secondo il costruttore



- Durante il collaudo a **cavitazione** si determina, per il **prefissato** regime di rotazione n della pompa e per una **data** portata Q_v , il valore dell'**NPSH** che accompagna l'insorgere della cavitazione

La cavitazione secondo il costruttore

- **NPSH** è l'energia totale in $[m]$ del fluido *misurata all'aspirazione al netto della tensione di vapore quando, per il regime di rotazione n e per la prestabilita portata Q_v di prova, si registra una prefissata caduta Δh della prevalenza, solitamente pari al 3% del valore nominale $h = f(Q_v)$ di collaudo*

$$\Rightarrow NPSH_R = \frac{p_i - p_v}{\rho g} + \frac{c_i^2}{2g} \Big|_{h=f(Q_v)=0,97 \bar{h}}$$

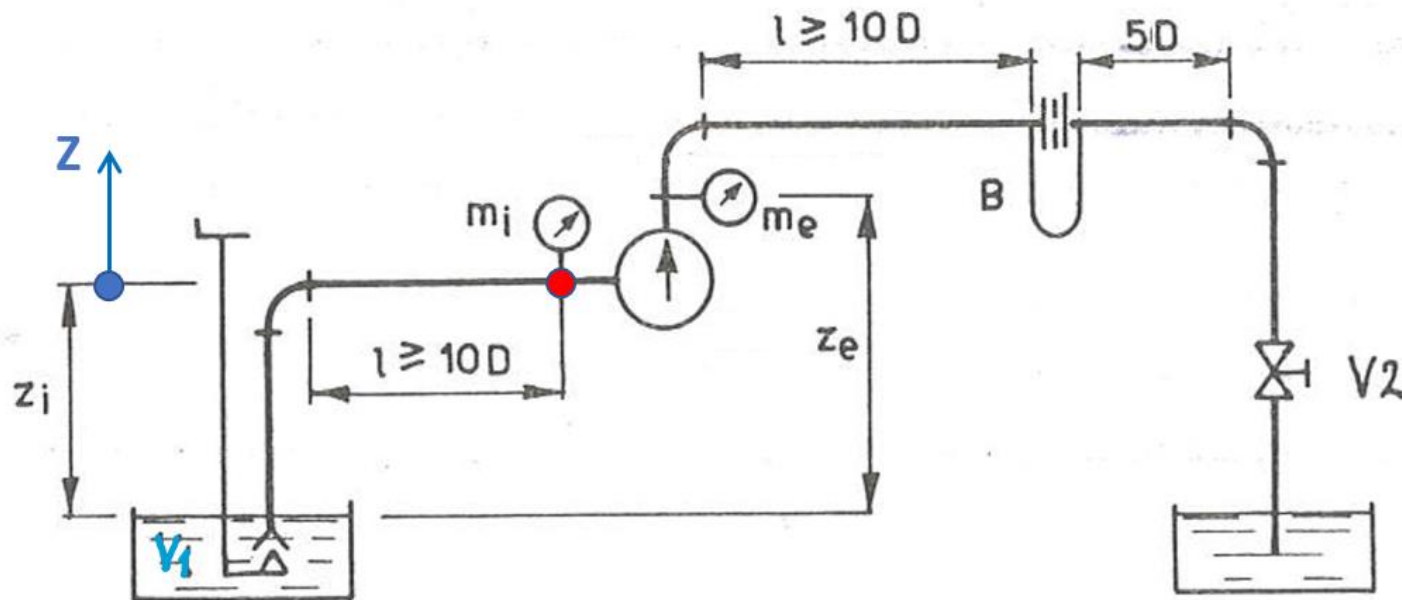
- **$NPSH_R$** è anche detta **NPSH** richiesta dalla macchina per cavitare

Se è un'energia del fluido



Dove è la componente z dell'energia??

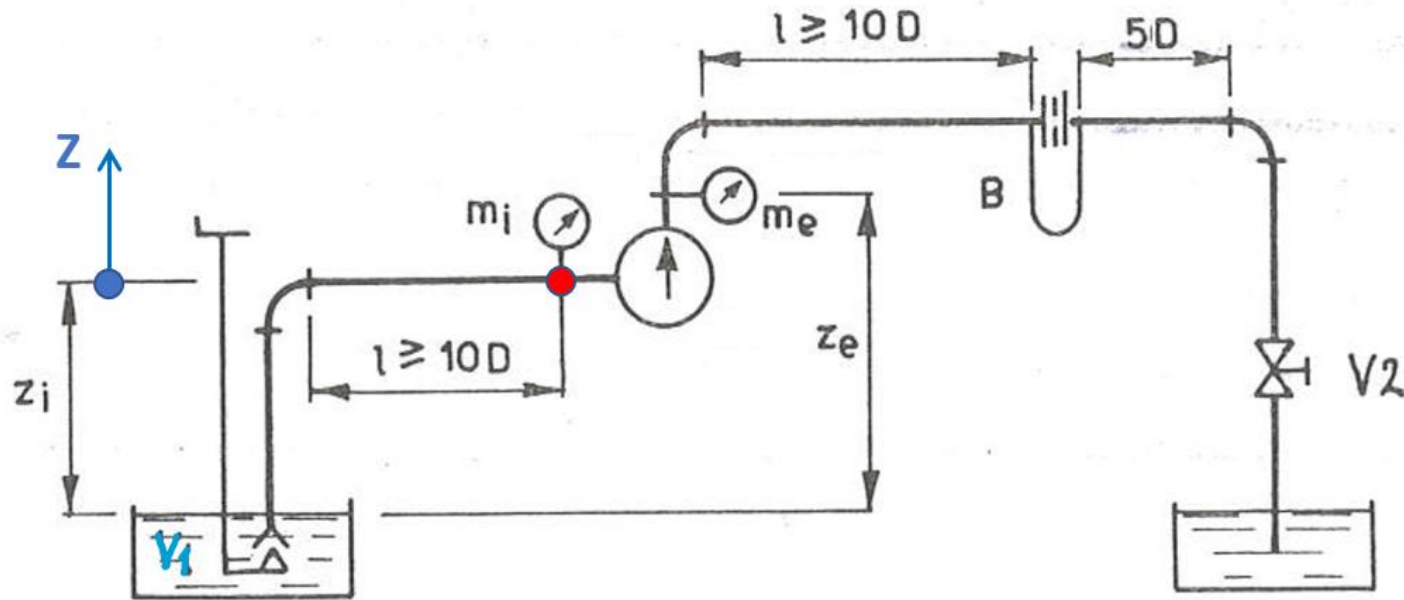
La cavitazione secondo il costruttore



$$NPSH = \frac{p_i - p_v}{\rho g} + \frac{c_i^2}{2g}$$

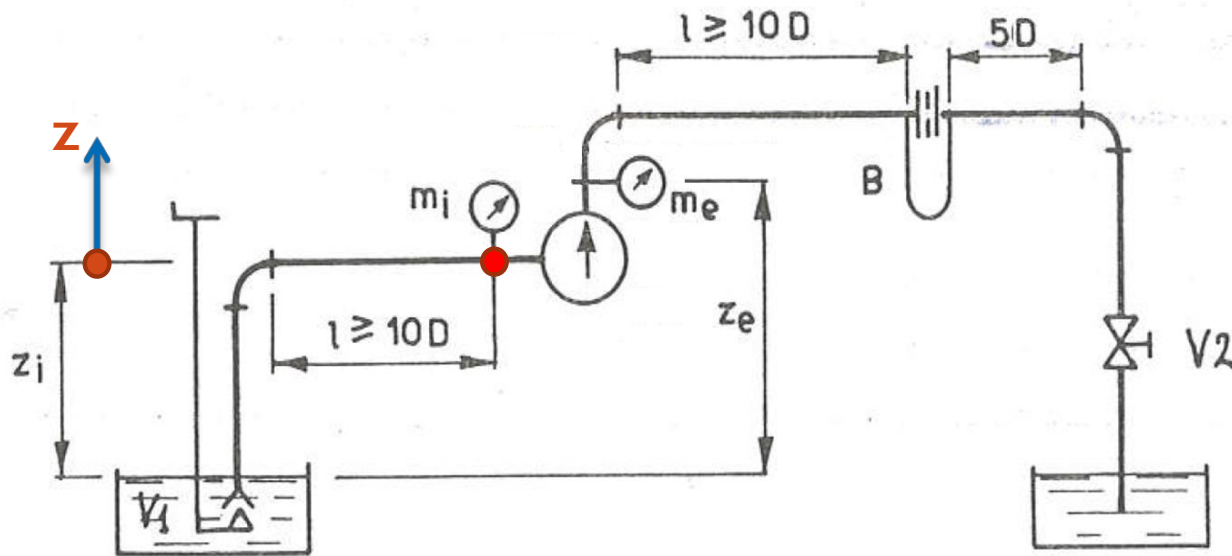
- Per il calcolo del valore corrente di $NPSH$ si assume quale **zero** delle quote geodetiche il piano di riferimento passante per l'asse della macchina
- ⇒ E' per questa la ragione che non compare la quota z_i nell'espressione dell' $NPSH$

La cavitazione secondo il costruttore



- La tensione di vapore p_v fornita dai diagrammi di stato del fluido di prova in funzione della temperatura del fluido operativo
 - ⇒ Durante le prove è dunque **necessario** misurare la temperatura T_i , collocando un termometro in corrispondenza della sezione i

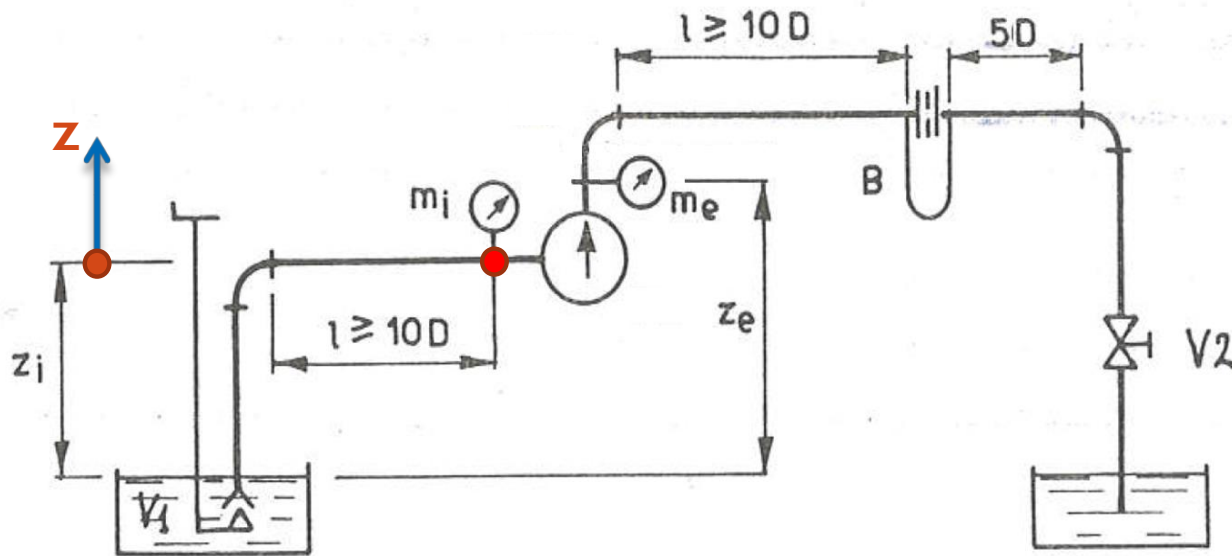
La cavitazione secondo il costruttore



$$NPSH = \frac{p_i - p_v}{\rho g} + \frac{c_i^2}{2g}$$

- Negli impianti a **circuito aperto** come quello di figura, l'aumento di **temperatura** del fluido causato dalle perdite di carico si può ritenere trascurabile per l'ampio volume dei serbatoio di aspirazione
- Negli impianti a **circuiti chiuso**, la temperatura T_i deve essere tenuta costante durante le prove mediante un **scambiatore di calore posto a monte della pompa**

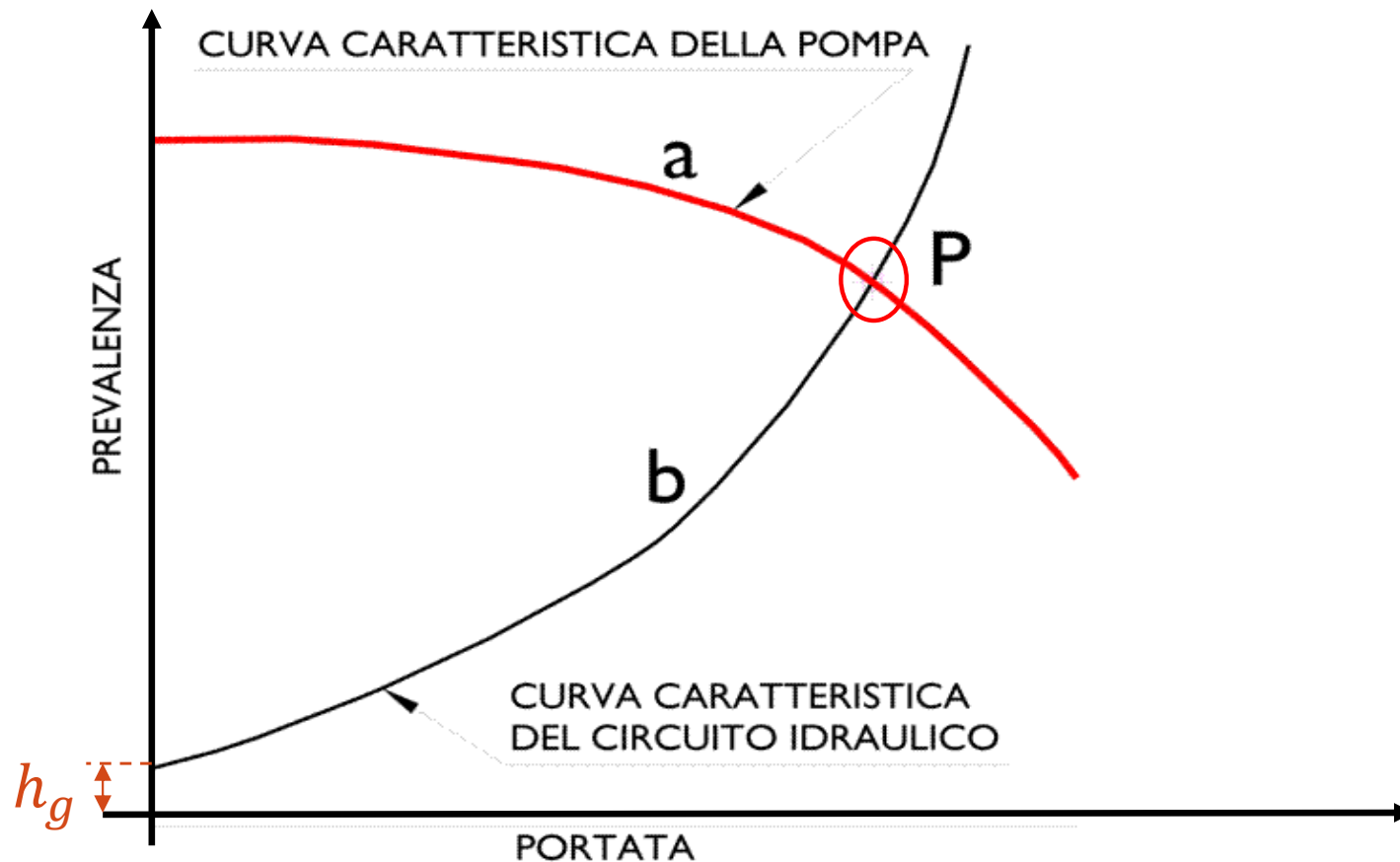
La cavitazione secondo il costruttore



$$NPSH = \frac{p_i - p_v}{\rho g} + \frac{c_i^2}{2g}$$

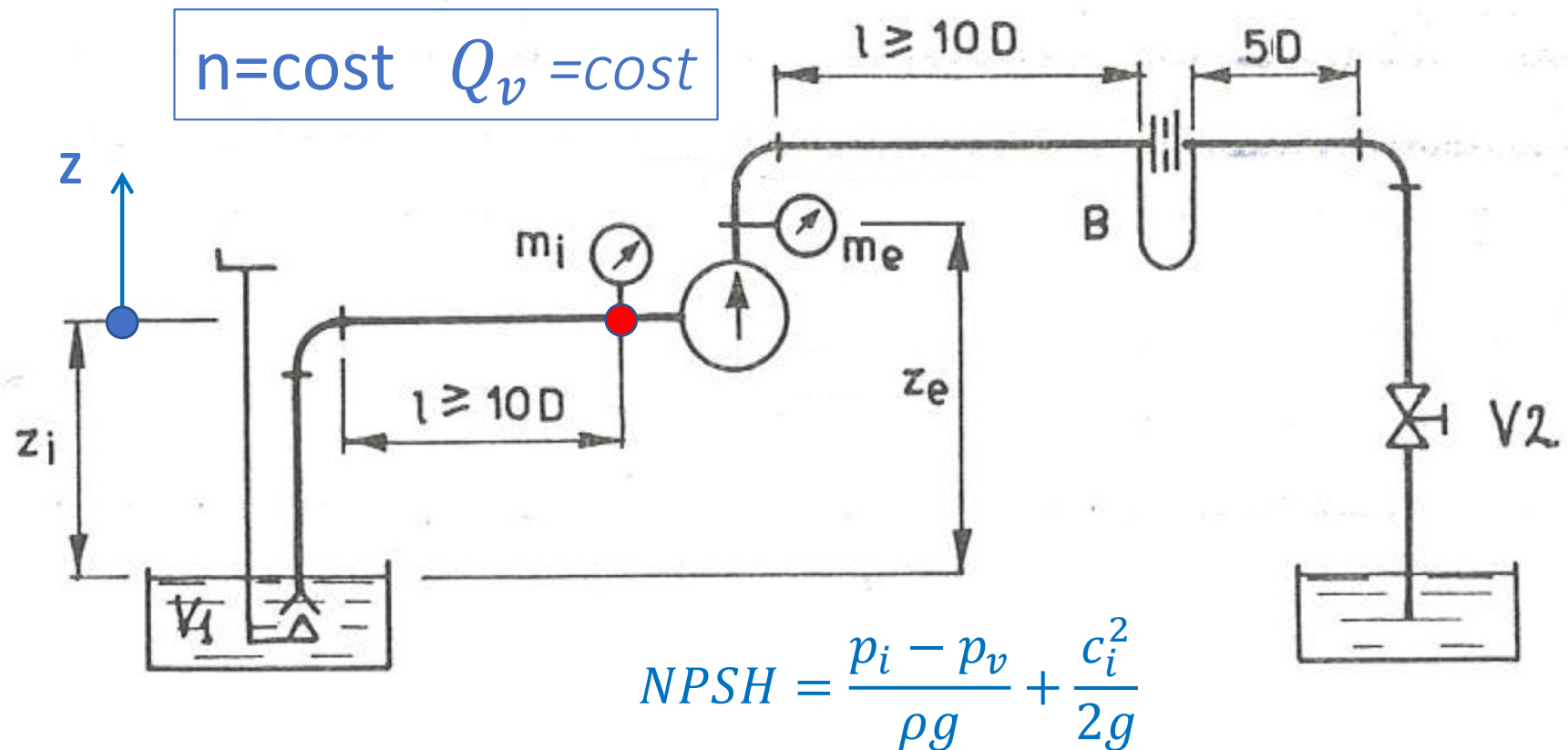
- Per un fissato regime di rotazione n e per una data portata Q_v , per determinare il corrispondente valore di $NPSH_R$ si deve ridurre la pressione statica all'aspirazione p_i introducendo delle perdite di carico a monte tramite la valvola V_1

La cavitazione secondo il costruttore



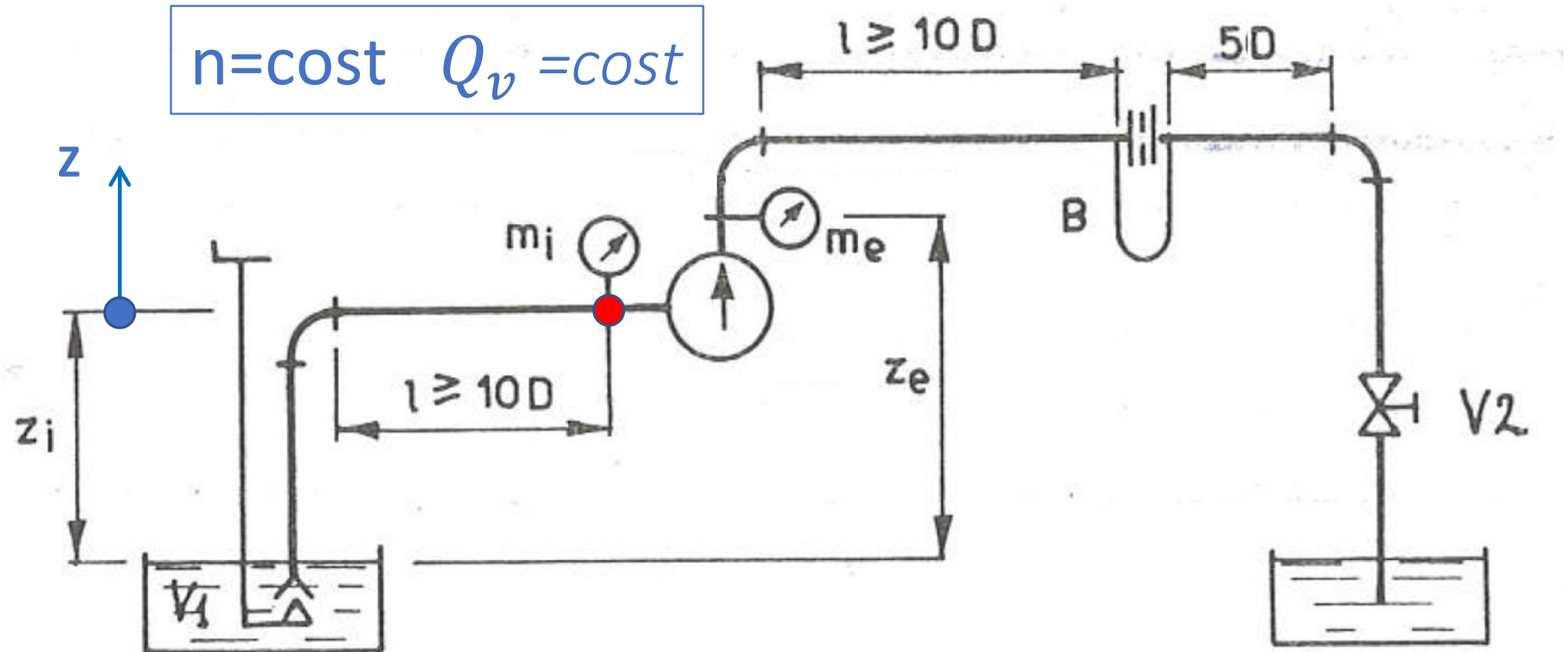
- Se si introducono perdite di carico, si varia anche la **caratteristica resistente** dell'impianto e quindi, per il carattere autoregolante della macchina, la portata Q_v varia

La cavitazione secondo il costruttore



- Per mantenere la portata Q_v costante, si deve compensare l'incremento delle perdite di carico a monte della macchina riducendo le perdite a valle della macchina (tramite V_2)

La cavitazione secondo il costruttore

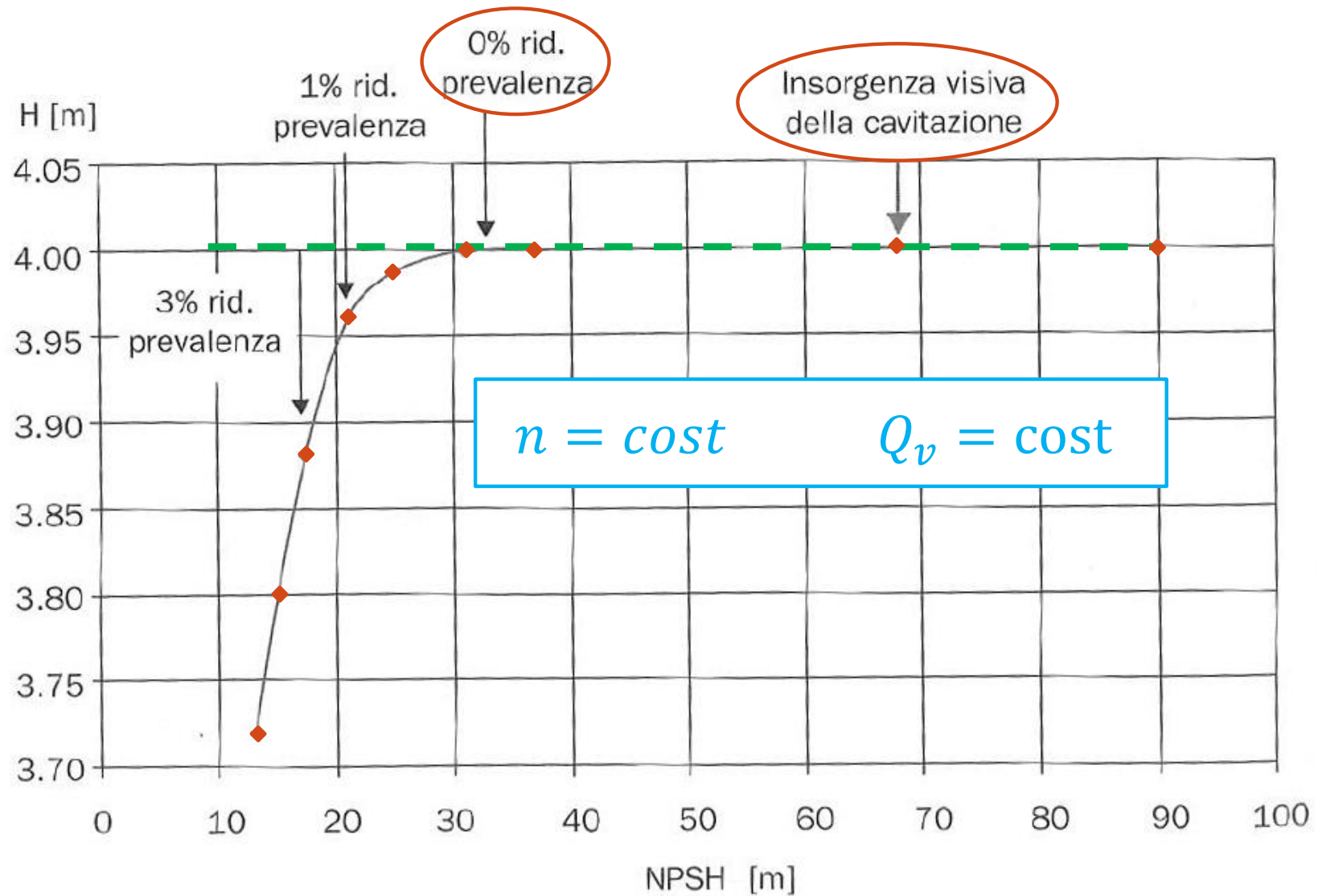


Al diminuire di p_i :

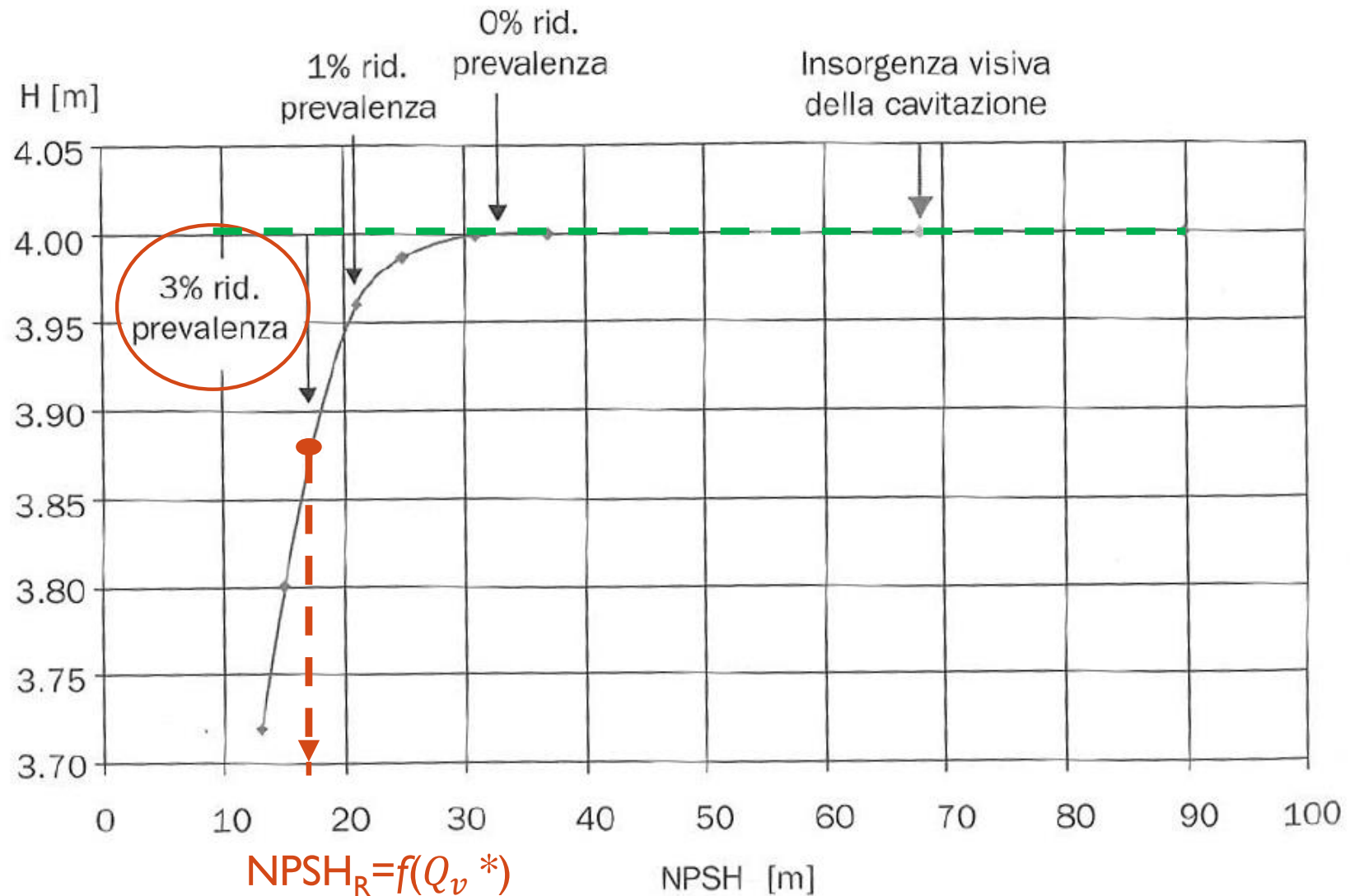
- si determina l' $NPSH$
- si misura la prevalenza h

$$NPSH = \frac{p_i - p_v}{\rho g} + \frac{c_i^2}{2g}$$

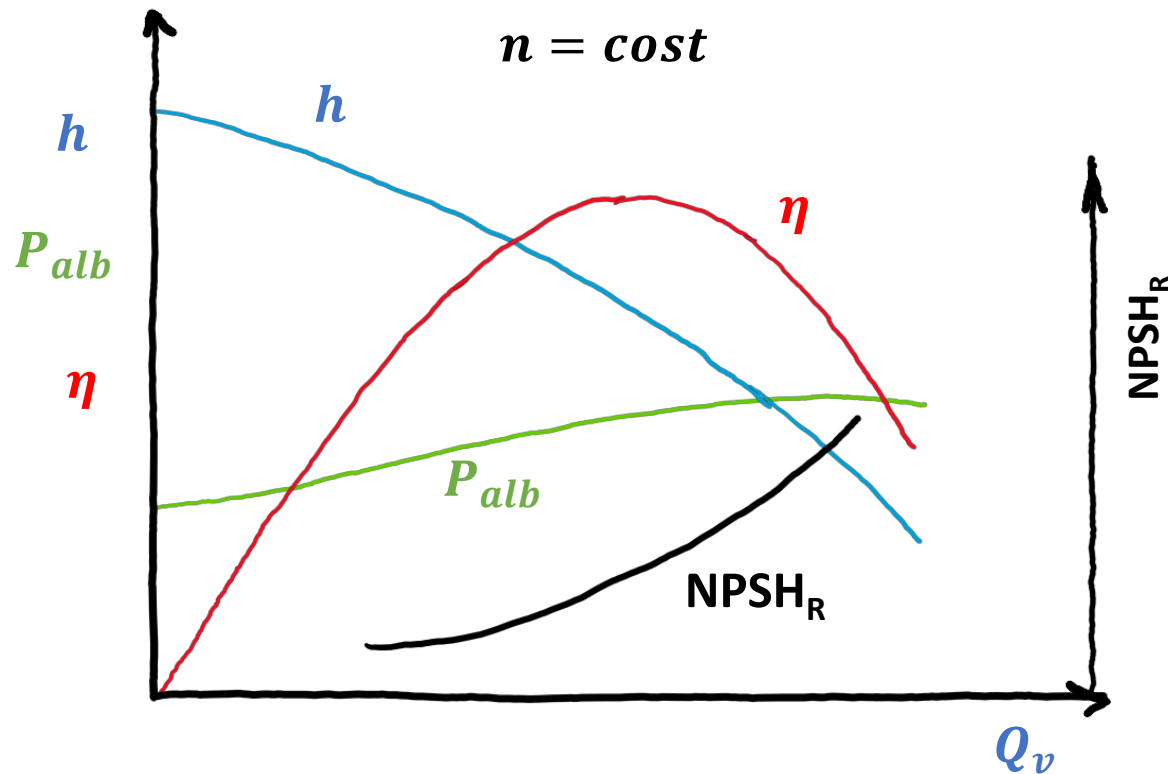
La cavitazione secondo il costruttore



La cavitazione secondo il costruttore

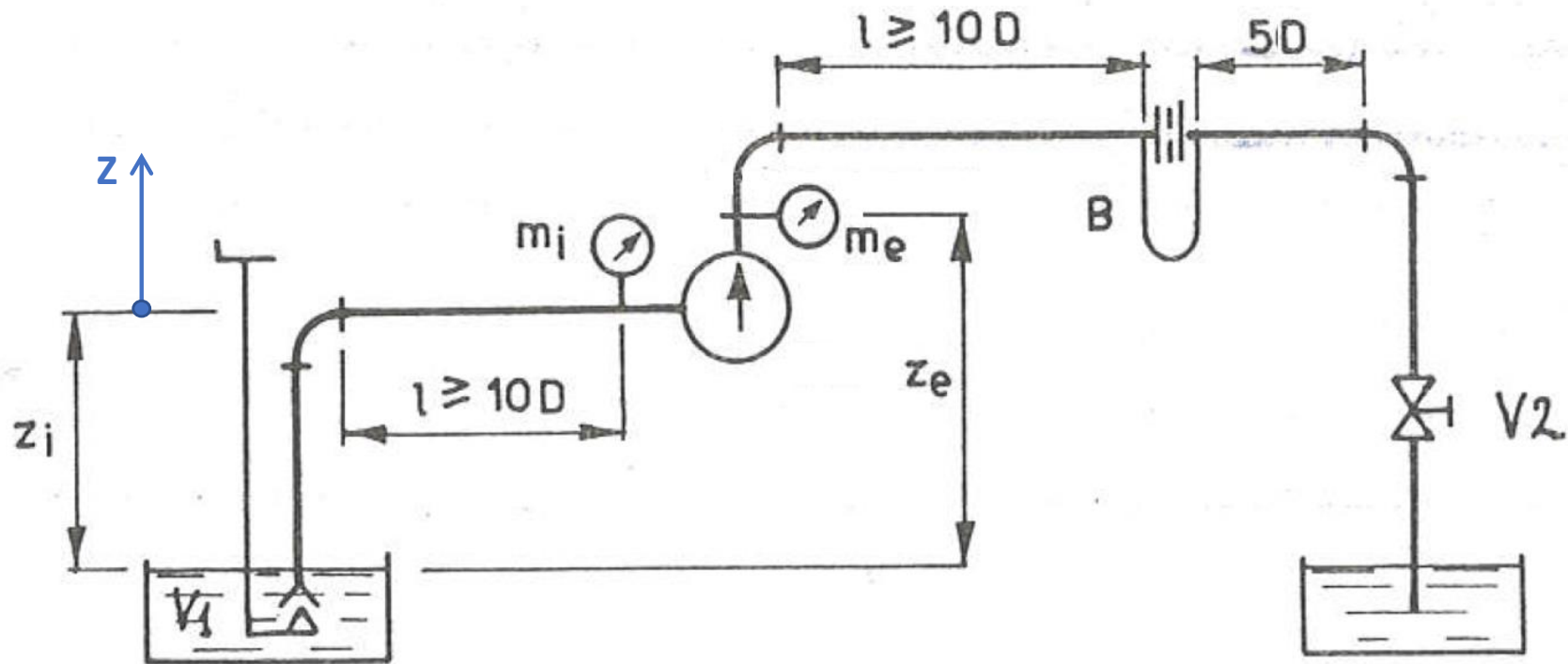


La cavitazione secondo il costruttore



Andamento tipico dell' NPSH_R richiesto da una pompa per cavitare

La cavitazione secondo l'utilizzatore

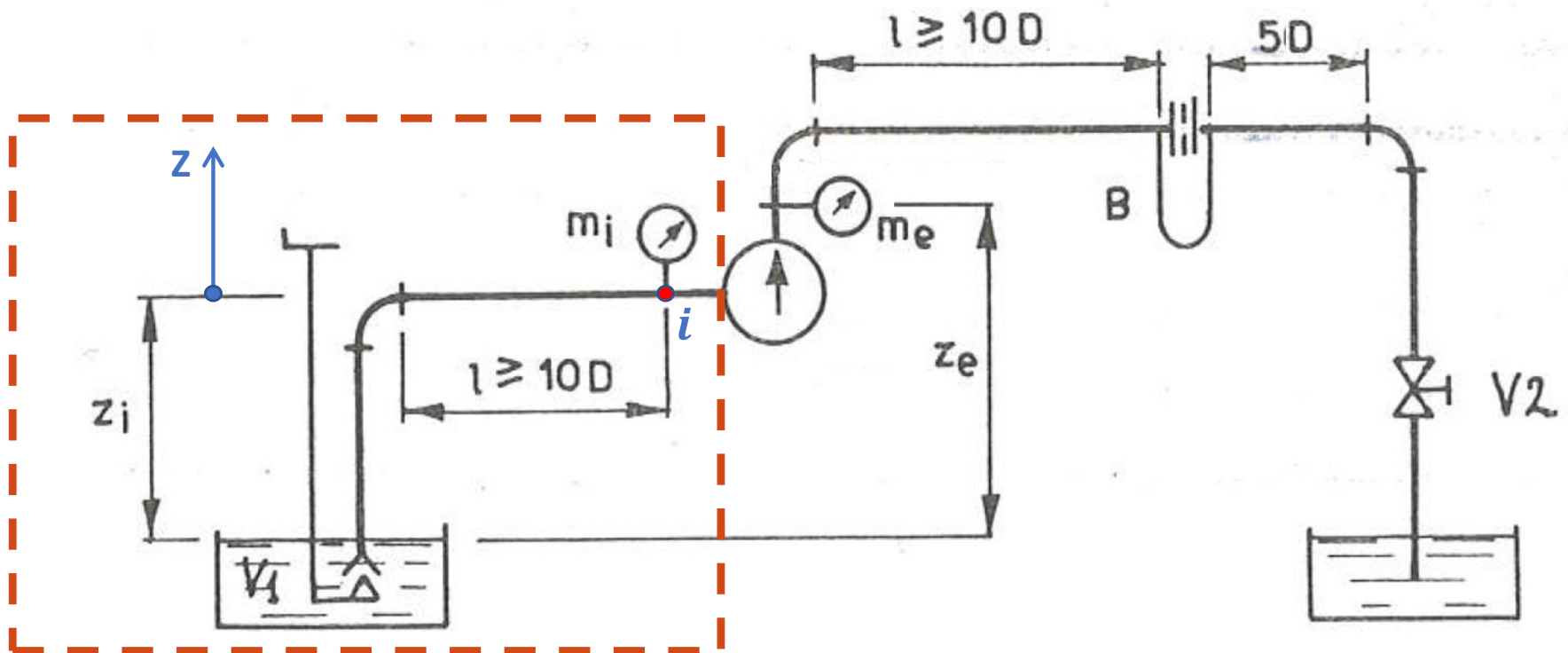


- L'**utilizzatore** deve verificare che la macchina non sviluppi cavitazione nell'impianto in cui verrà inserita
- Conosce le curve caratteristiche e quindi l' $NPSH_R$ richiesto dalla macchina e fornito dal costruttore



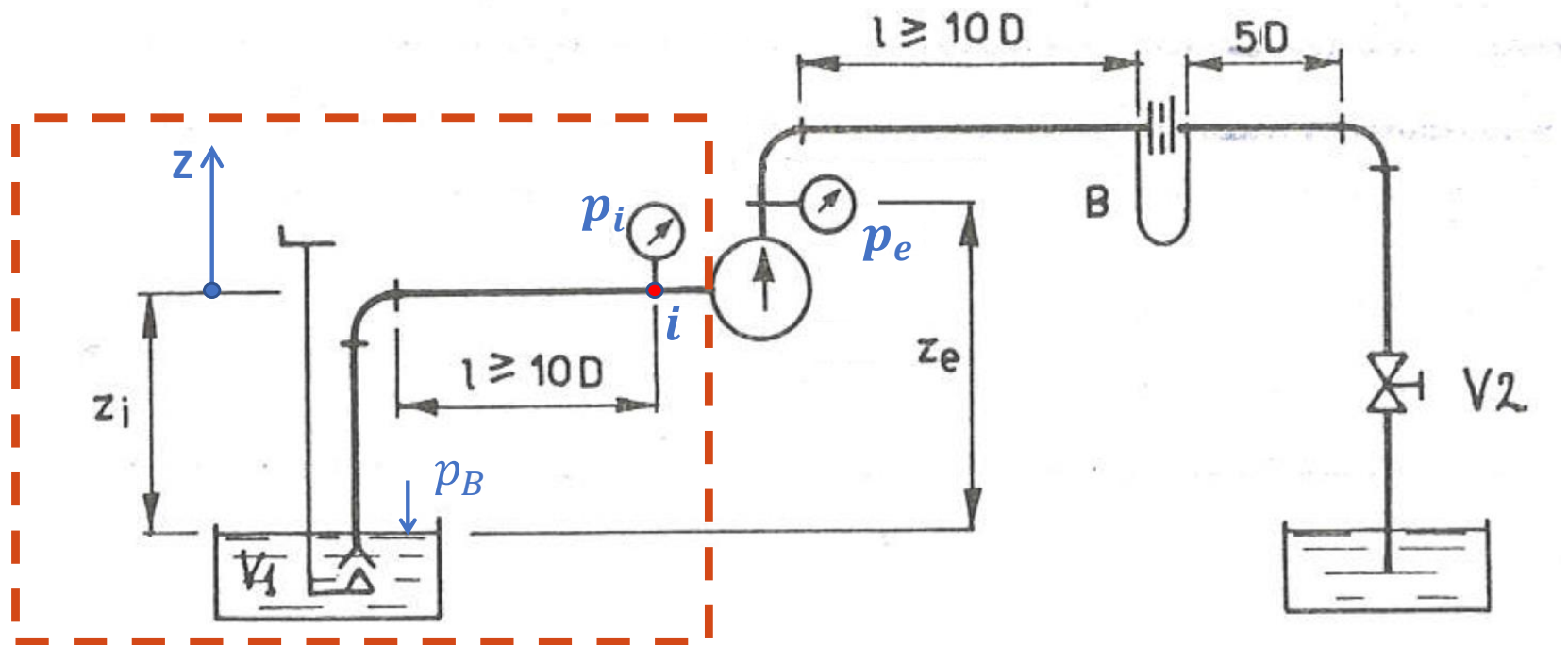
La Cavitazione secondo il UTILIZZATORE

La cavitazione secondo l'utilizzatore



- Bisogna **verificare** che nella sezione di **aspirazione** il fluido abbia un'energia totale (al netto della tensione di vapore) superiore a quella richiesta dalla macchina ($NPSH_R$) per cavitare

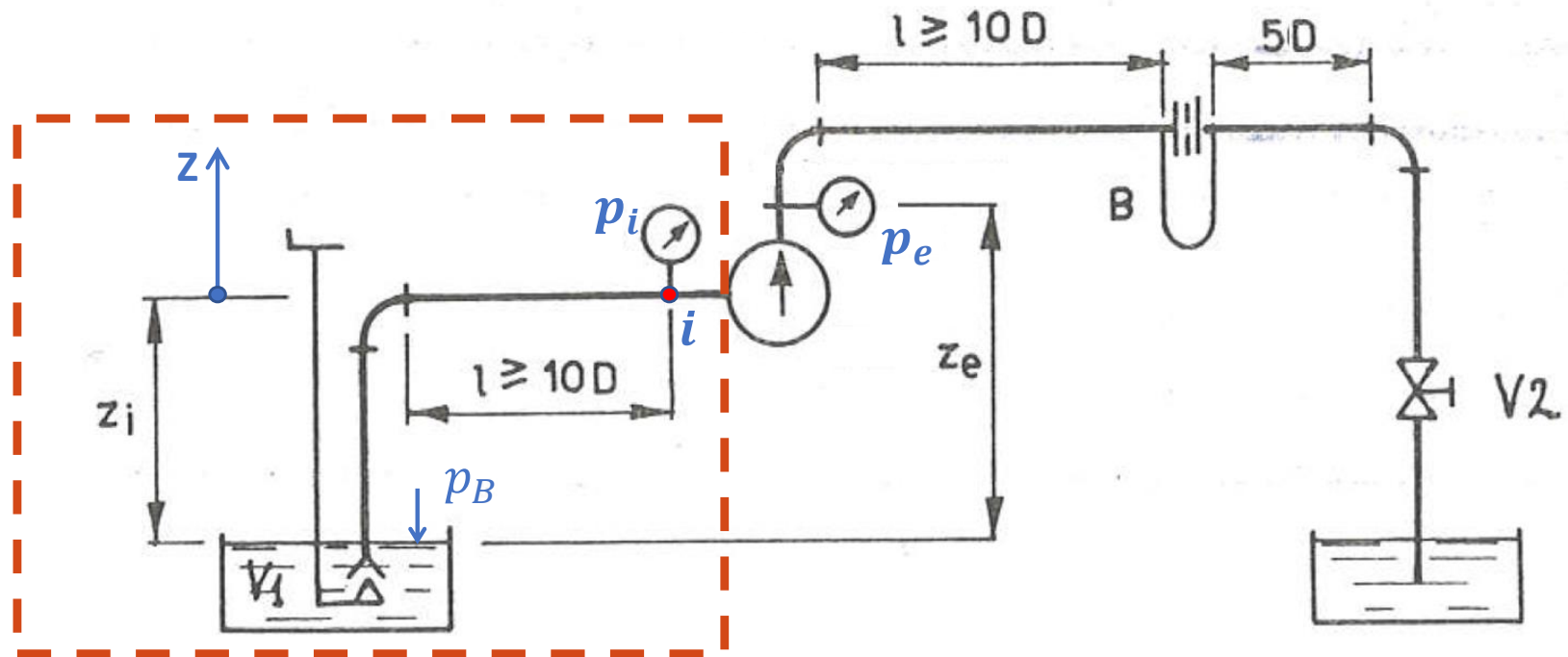
La cavitazione secondo l'utilizzatore



- Si ottiene applicando l'equazione di Bernoulli tra il pelo libero del serbatoio di aspirazione, ove si suppone agisca la pressione p_B , e la sezione di ingresso i della pompa:

$$\frac{p_B}{\rho g} - |z_i| = \frac{p_i}{\rho g} + \frac{c_i^2}{2g} + h_{ri} \quad \longrightarrow \quad \frac{p_i - p_v}{\rho g} + \frac{c_i^2}{2g} = \frac{p_B - p_v}{\rho g} - |z_i| - h_{ri}$$

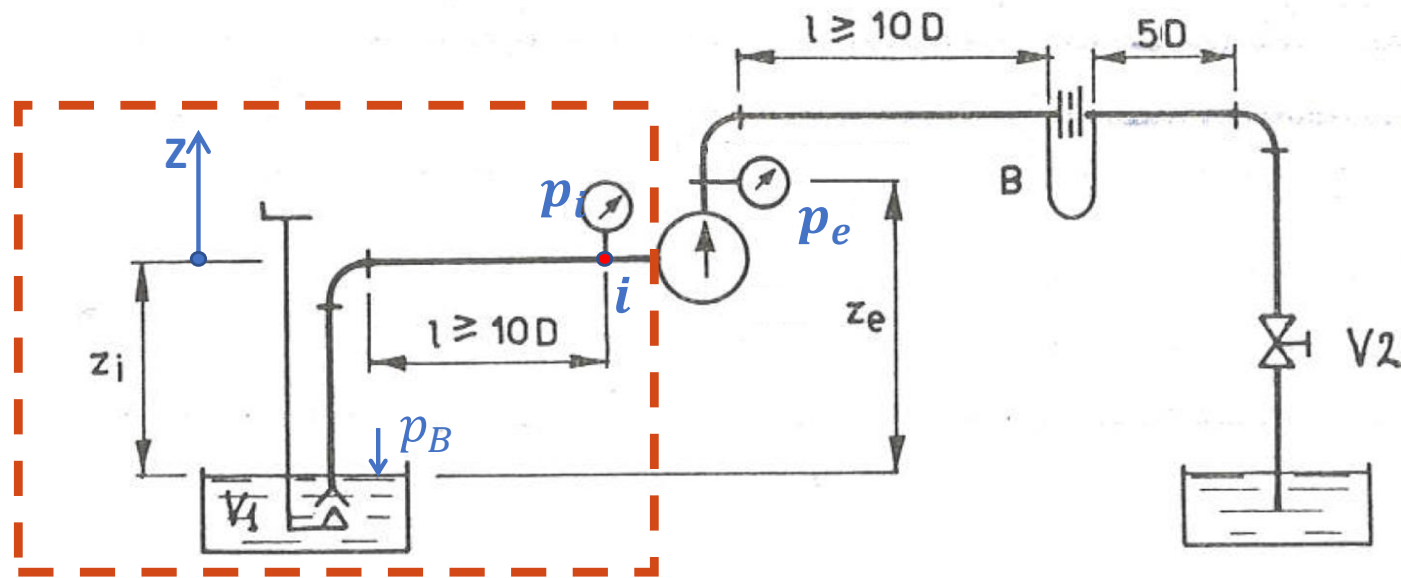
La cavitazione secondo l'utilizzatore



$$\frac{p_i - p_v}{\rho g} + \frac{c_i^2}{2g} = \frac{p_B - p_v}{\rho g} - |z_i| - h_{ri}$$

- Questa uguaglianza **vale** sempre, **anche** in condizioni di cavitazione
- Il **primo membro** rappresenta l'energia totale **al netto** della tensione di vapore nella sezione d'ingresso della pompa

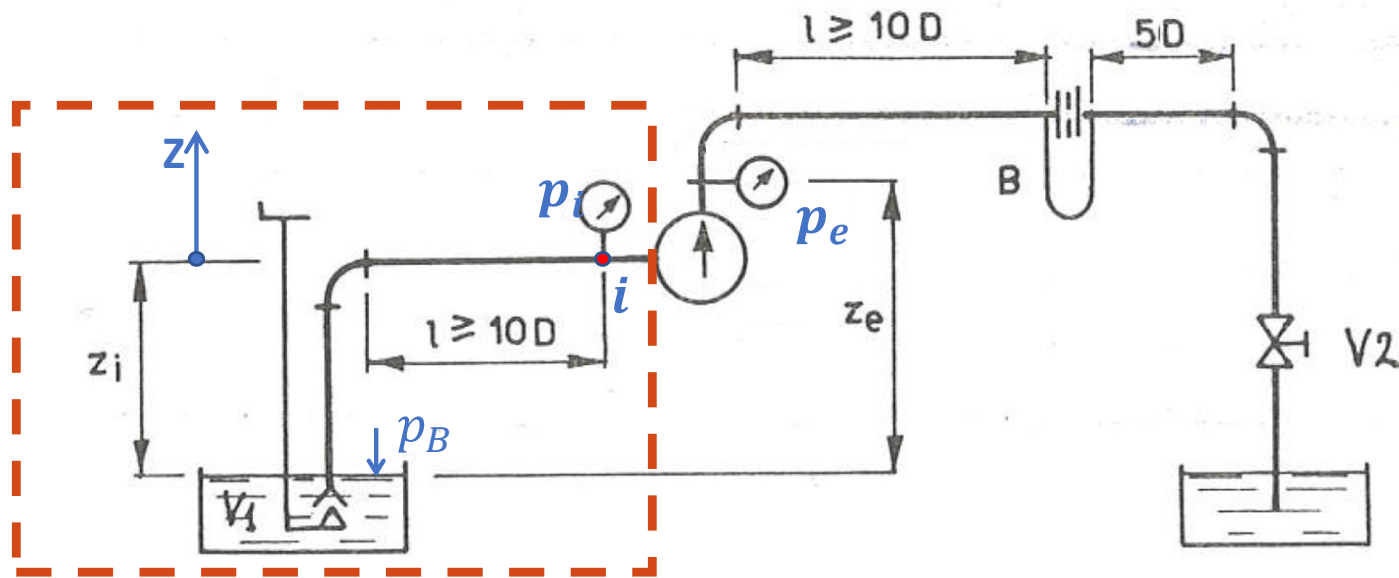
La cavitazione secondo l'utilizzatore



$$\frac{p_i - p_v}{\rho g} + \frac{c_i^2}{2g} = \frac{p_B - p_v}{\rho g} - |z_i| - h_{ri}$$

- Il **secondo membro** dipende **solo** dall'**impianto**: la quota z_i di installazione, le perdite di carico h_{ri} lungo la condotta di adduzione, la pressione p_B sul pelo libero del serbatoio a monte, la pressione atmosferica (se il serbatoio è aperto all'atmosfera come nell'esempio di figura o altra pressione legata alla funzionalità dell'impianto)

La cavitazione secondo l'utilizzatore

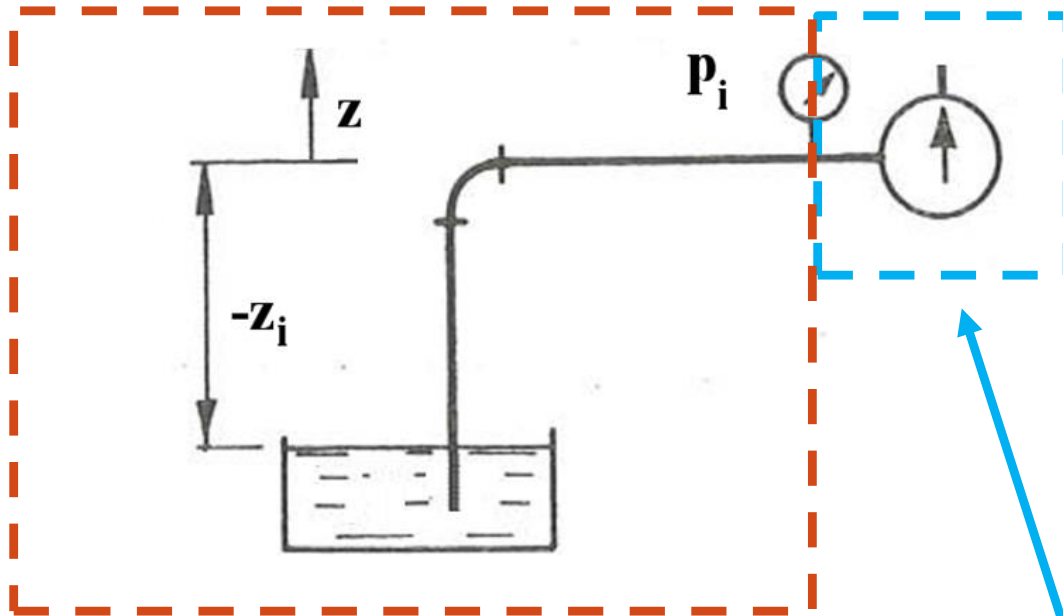


⇒ Si definisce *NPSH disponibile* dell'impianto la grandezza:

$$NPSH_D = \frac{p_B - p_v}{\rho g} - z_i - h_{ri}$$

e rappresenta l'*energia* totale al netto della tensione di vapore che l'*impianto* mette a *disposizione* del *fluido* all'*ingresso* della pompa

La cavitazione secondo l'utilizzatore



- Per non sviluppare cavitazione nella sezione di aspirazione:

Energia totale (al netto della tensione di vapore) messa a disposizione dall'impianto

NPSH_D

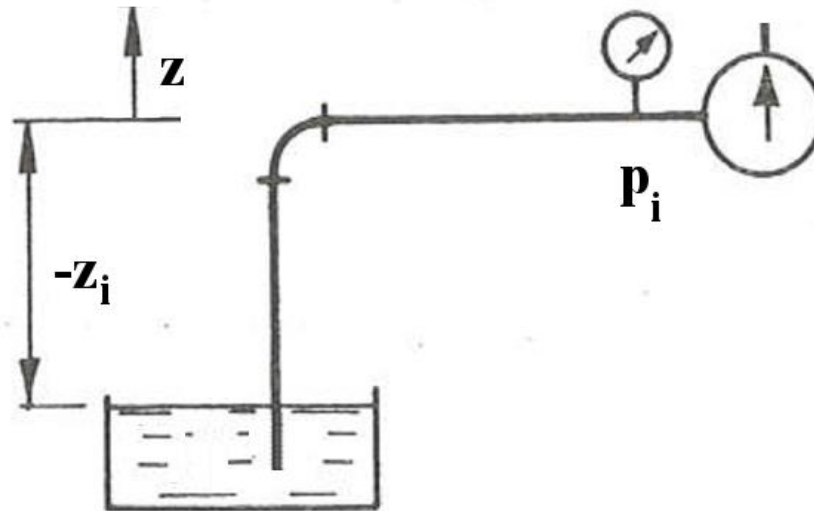
>

Minima riserva di energia al netto della tensione di vapore «ammissibile» all'aspirazione

>

NPSH_R

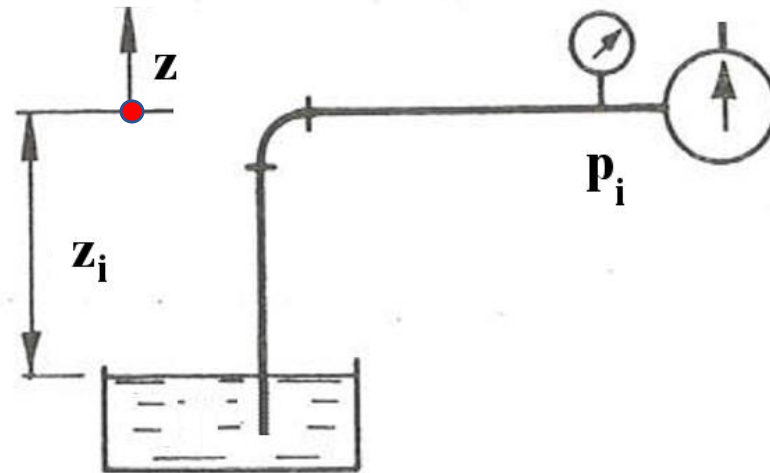
La cavitazione secondo l'utilizzatore



- Le condizioni di **installazione** vengono di solito **verificate** accertando che la **quota** di installazione Z_i , nello schema di figura, **non** sia superiore a quella **massima** Z_{limite} , solitamente associata ad un margine di sicurezza di $0.7 \div 1$ m rispetto all' $NPSH_R$

$$NPSH_D = \frac{p_B - p_v}{\rho g} - |Z_{limite}| - h_{ri} = NPSH_R + (0.7 \div 1) \rightarrow Z_{limite}$$

La cavitazione secondo l'utilizzatore



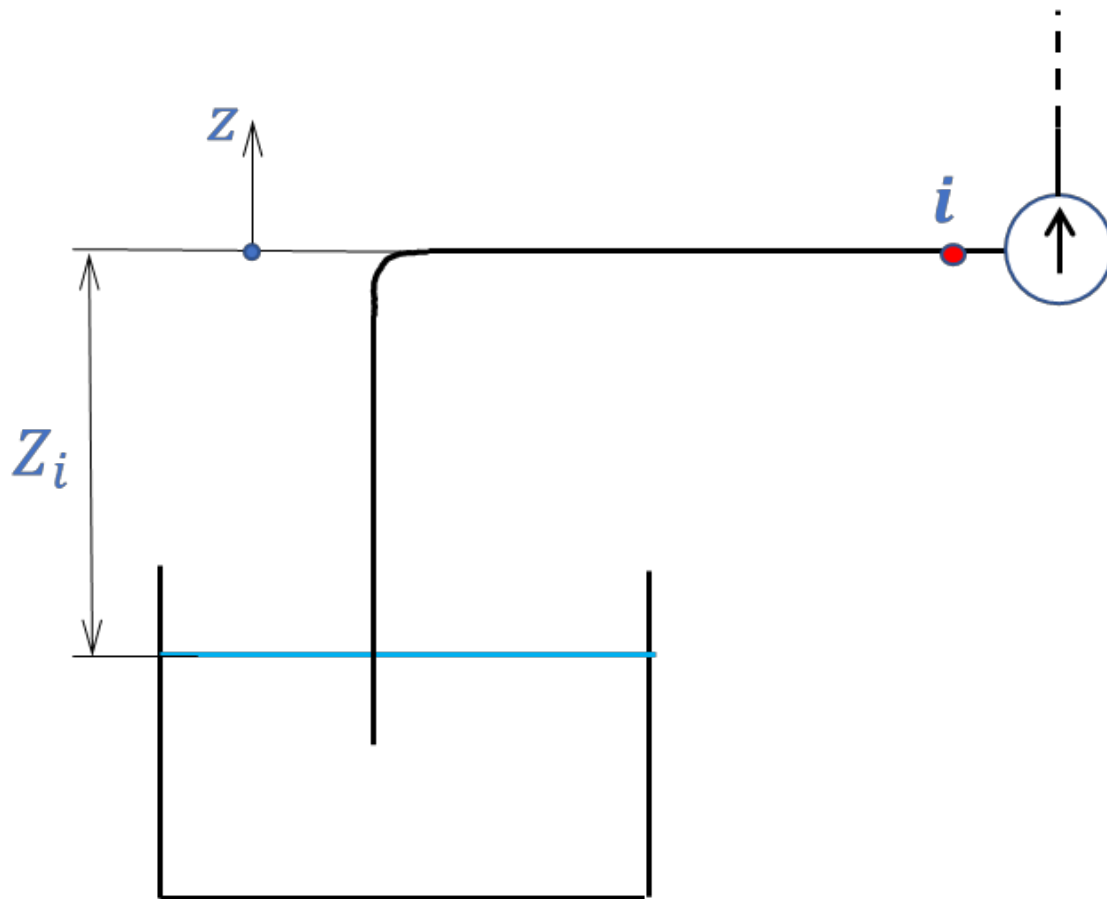
$$NPSH_D = \frac{p_B - p_v}{\rho g} - |Z_{limite}| - h_{ri} = NPSH_R + (0,7 \div 1) \rightarrow Z_{limite}$$

⇒ Qualora la quota limite risultasse negativa ($Z_{limite} < 0$), la pompa deve essere collocata **sotto battente**, ovvero al di sotto del pelo libero del serbatoio di aspirazione di una quota non inferiore a $|Z_{limite}|$



La Cavitazione: ESERCIZI

Esercizio 1



Dati:

$$h_{ri} = 2,5 \text{ m}$$

$$p_B = 101,3 \text{ kPa}$$

$$p_v = 2,34 \text{ kPa} \quad (20^\circ \text{ C})$$

$$NPSH_R = 4 \text{ m}$$

Determinare la quota Z_i a cui installare la pompa

COME FACCIAMO A CAPIRE DOVE INSTALLARE
LA MACCHINA PERCHÉ NON CAVITI?

SVOLGIMENTO

$$NPSH_D > NPSH_R$$

$$\frac{P_B - P_V}{\rho g} - z_{LIMITE} - h_{ri} \geq NPSH_R + (0,7 : 1 \text{ m})$$

SCELGO UN MARGINE DI 0,5 m

$$NPSH_D = NPSH_R + 0,5 = 4 + 0,5$$

$$NPSH_D = 4,5 \text{ m}$$

DOVE POSIZIONO LA POMPA?

$$NPSH_D = \frac{P_B - P_V}{\rho g} - z_{LIM} - h_{ri}$$

$$4,5 = \frac{101300 - 2340}{1000 \cdot 9,806} - z_{LIM} - 2,5$$

$$4,5 = 10,0897 - z_{LIM} - 2,5$$

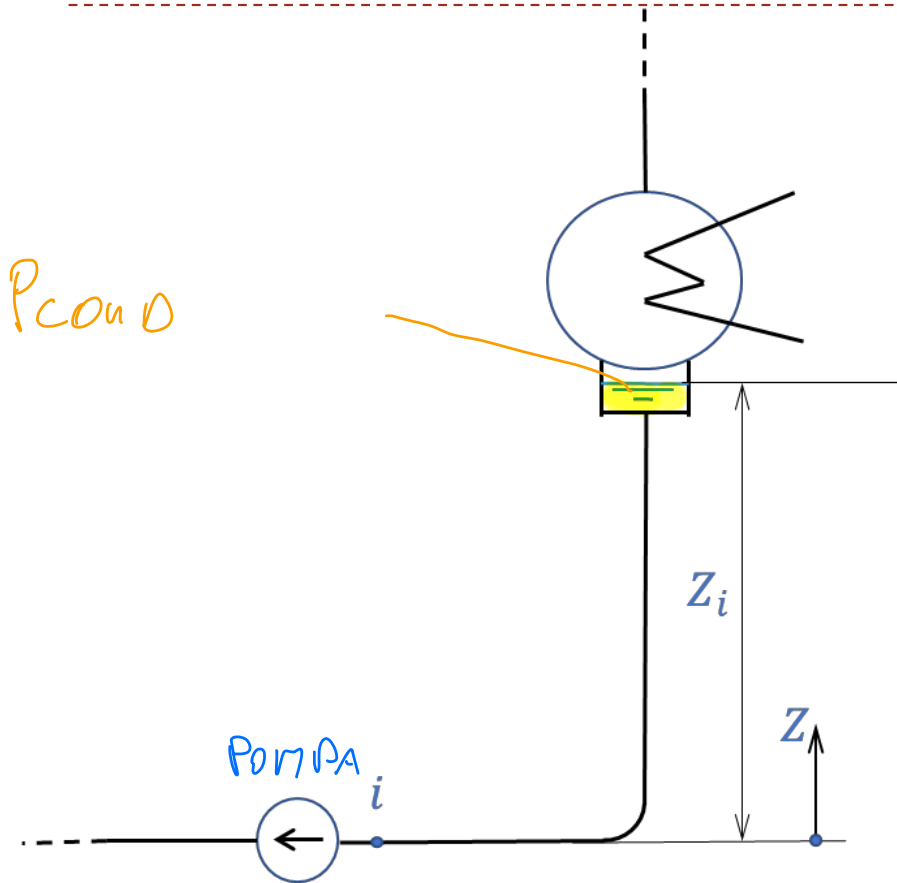
$$z_{LIM} \approx 3,09 \text{ m}$$

QUESTO VALORE SIGNIFICA CHE PER

L'INSTALLAZIONE $z_L \leq z_{LIM}$

$$z_i = 3,09 \text{ m}$$

Esercizio 2



Si consideri una pompa per l'estrazione di condensato.

- Sia $Z_i = 3 \text{ m}$
- Si assumano pari a $0,8 \text{ m}$ le perdite di carico h_{ri} tra il pelo libero del condensato nel pozzetto caldo del condensatore e la sezione di ingresso i della pompa

Si determini il valore limite dell' $NPSH_R$ della pompa

$$NPSH_D > NPSH_R$$

$$NPSH_D \geq NPSH_R + \text{MARGINE DI SIC (0,7 ÷ 1 m)}$$

$$NPSH_D = \frac{P_B - P_V}{\rho g} - z_{LH} - h_{ri}$$

$$NPSH_R = \frac{P_a - P_V}{\rho g} + \frac{C_a^2}{2g}$$

$P_V = ?$ dipende dalla pressione di condensazione
del perfetto vapore

NEL COND equilibrio tra liq e vapore

$$P_{COND} = P_V \text{ ma } P_{COND}$$

CALCOLO $NPSH_D$

$$NPSH_D = \frac{P_B - P_V}{\rho g} - z_{LH} - h_{ri}$$

ma non posso dell'ambiente $\rightarrow$ preso da $P_V = P_{COND}$

~~$$NPSH_D = \frac{P_V - P_V}{\rho g} - z_{LH} - h_{ri}$$~~

e z_{LH} quanto vale? $z_{LH} = -3 \text{ m}$

$$NPSH_D = -(-3) - 0,8 = 3 - 0,8 = 2,2 \text{ m}$$

e $NPSH_R$?

$$NPSH_D \geq NPSH_R \text{ allora } NPSH_R \leq 2,2 \text{ m.}$$

Domande, Curiosità, Dubbi, Perplessità?

