



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



Dipartimento
di Ingegneria Industriale

La cavitazione

Corso di Macchine 1

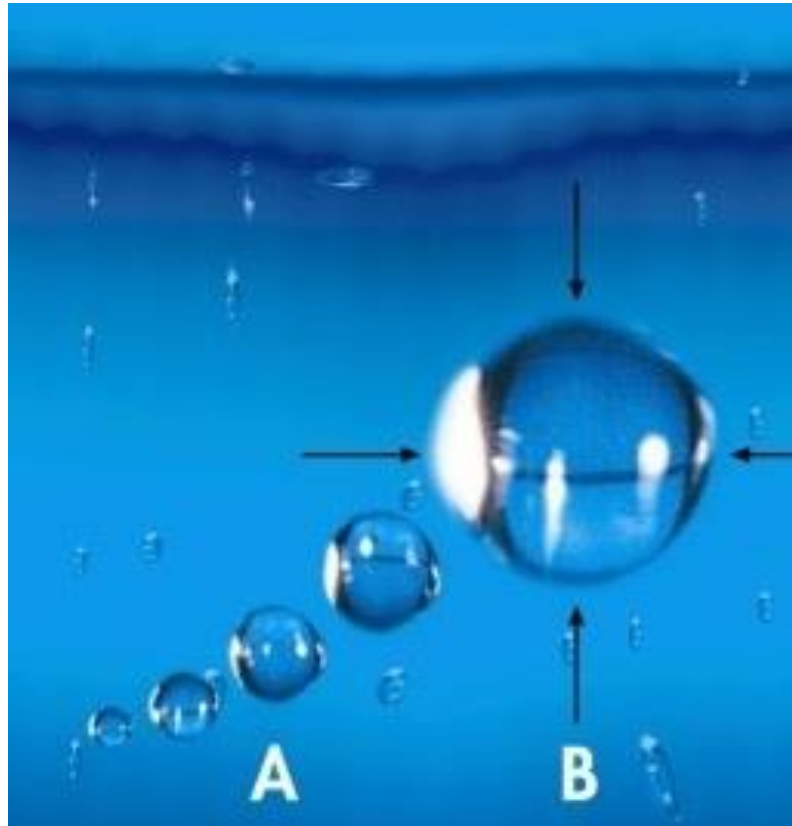
Agenda

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

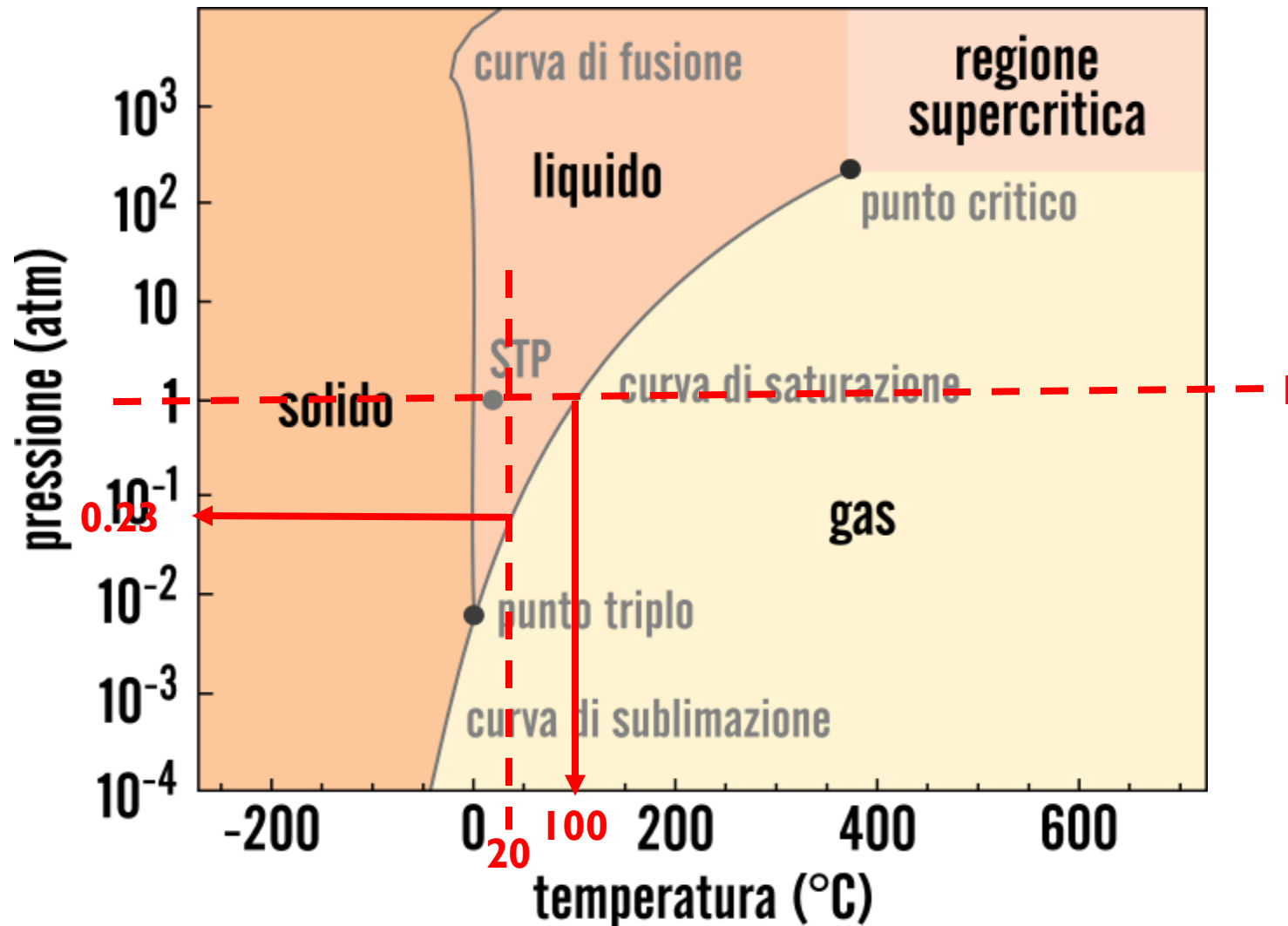
Il fenomeno della Cavitazione

Il fenomeno della cavitazione

- Si sviluppa quando la pressione del fluido raggiunge il valore della tensione di vapore
- Consiste nella formazione ed evoluzione di cavità di vapore in un liquido

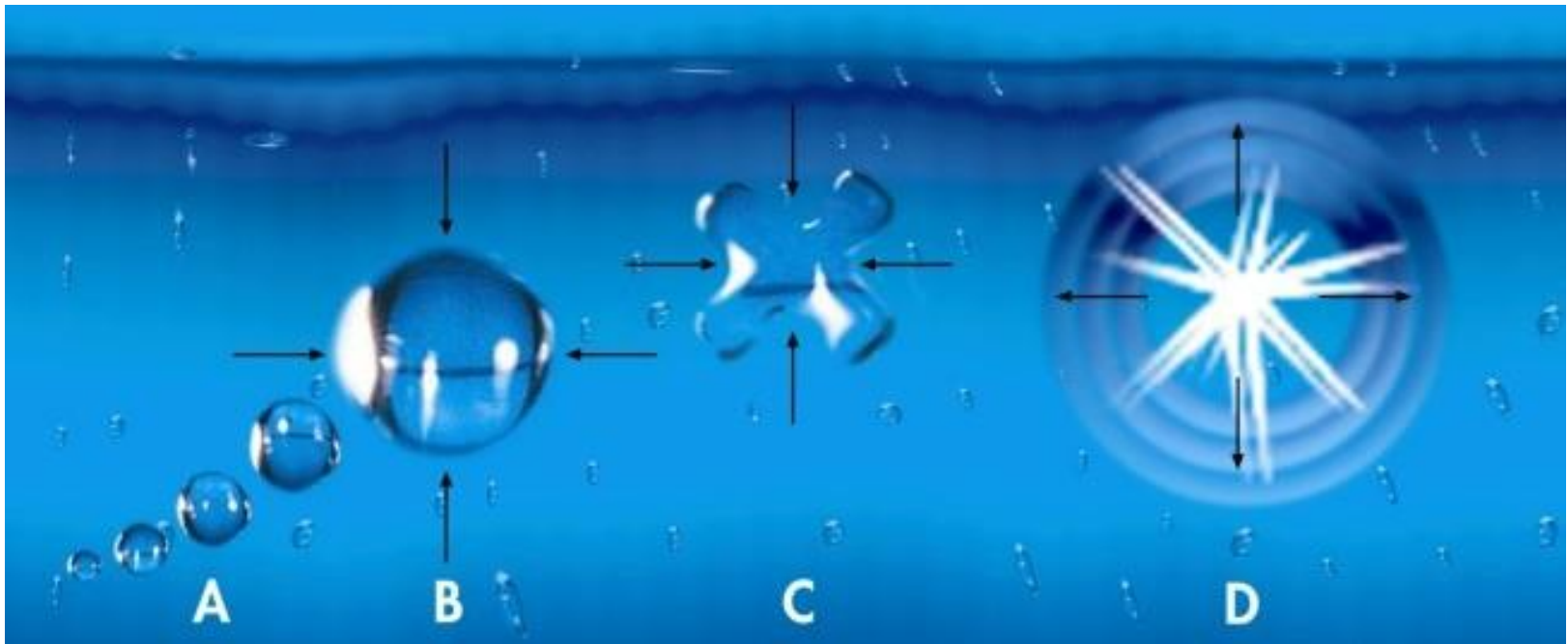


Il diagramma di fase



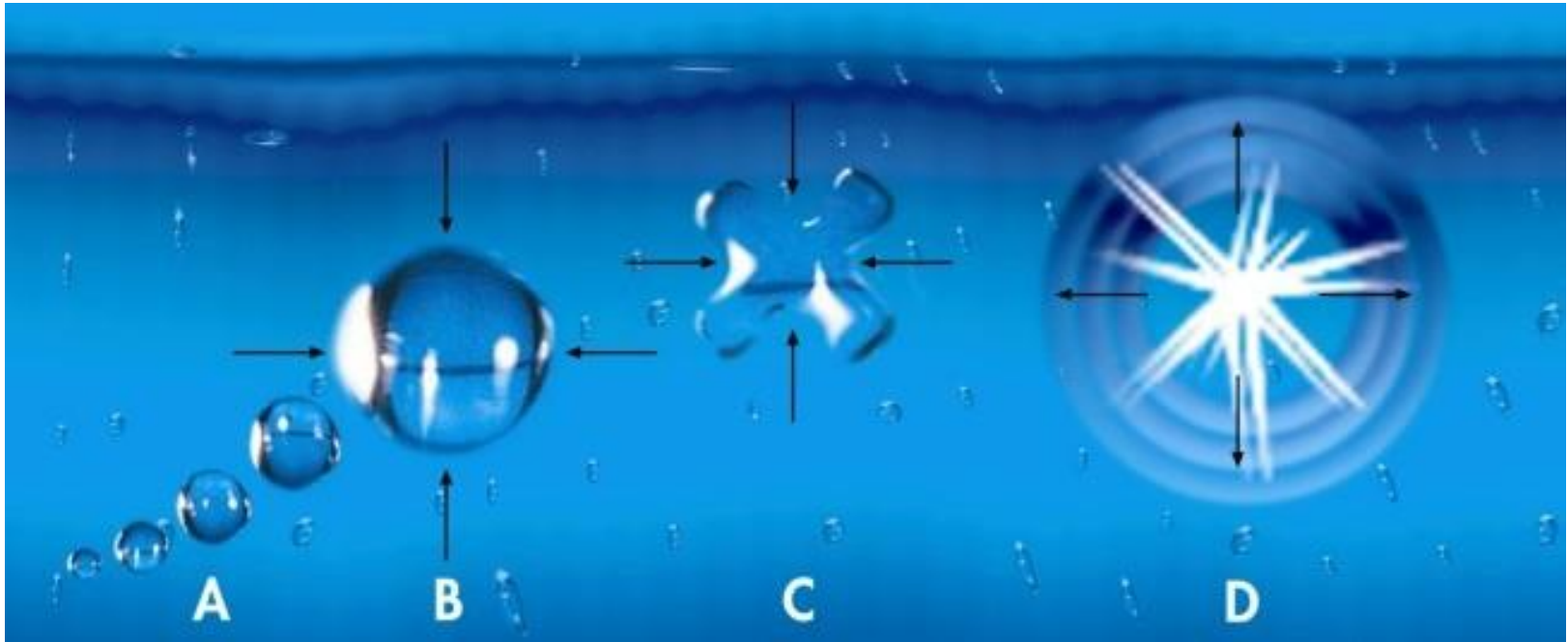
Il fenomeno della cavitazione

- Le cavità sono costituite da bolle all'interno delle quali agiscono la **pressione del vapore saturo** e la pressione dovuta ad eventuali **altri gas disciolti** (es. aria)
- Al diminuire della pressione locale, le dimensioni della bolla aumentano (da microscopiche a macroscopiche)



Il fenomeno della cavitazione

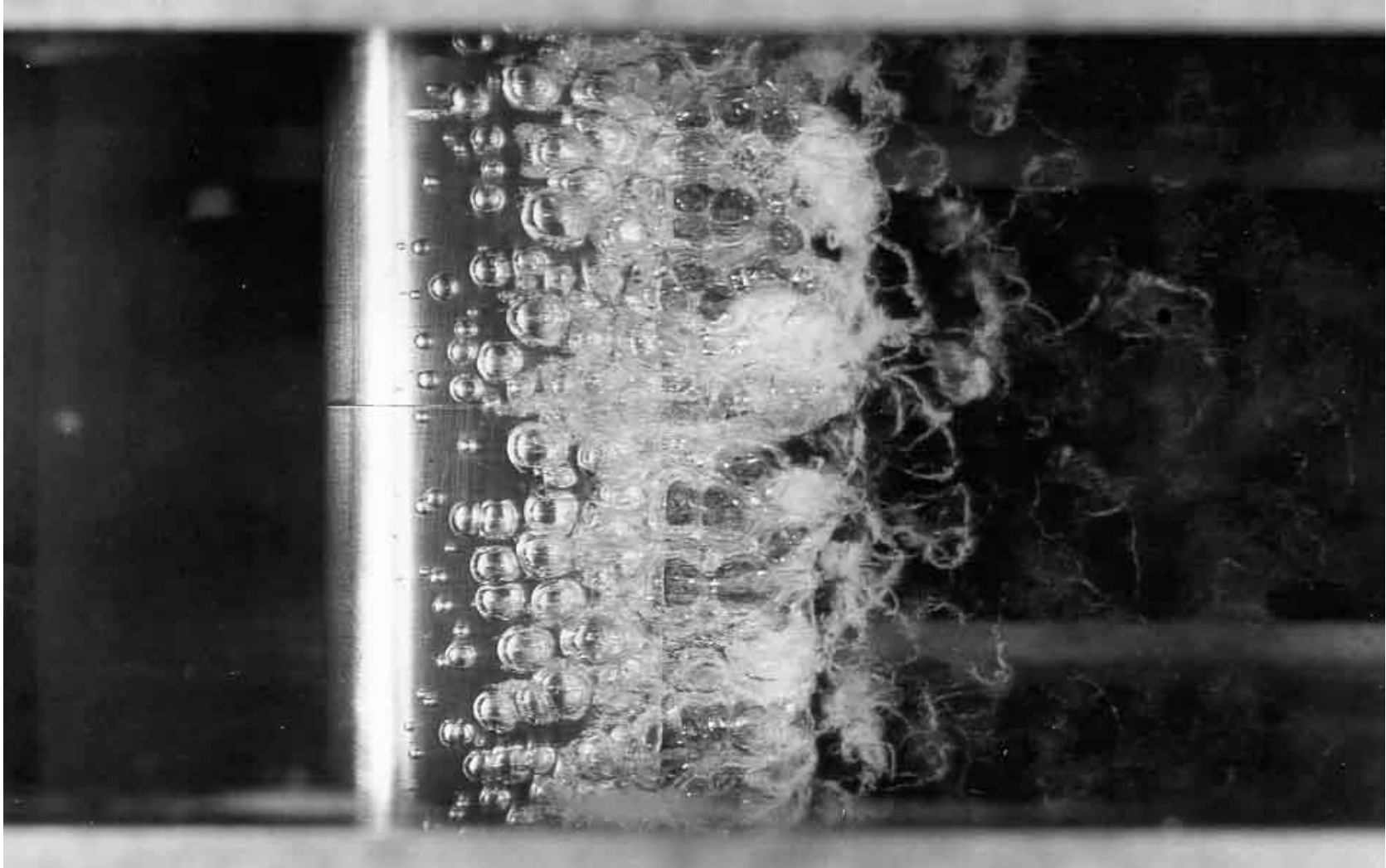
- Una volta generate, le bolle fluiscono con la corrente fluida principale
- Quando arrivano in una zona a pressione più elevata, il vapore in esse racchiuso condensa improvvisamente e le bolle implodono improvvisamente generando onde di pressione



Sviluppo ed implosione di una bolla



Il fenomeno



Profilo Palare NACA

Sviluppo e danni della cavitazione



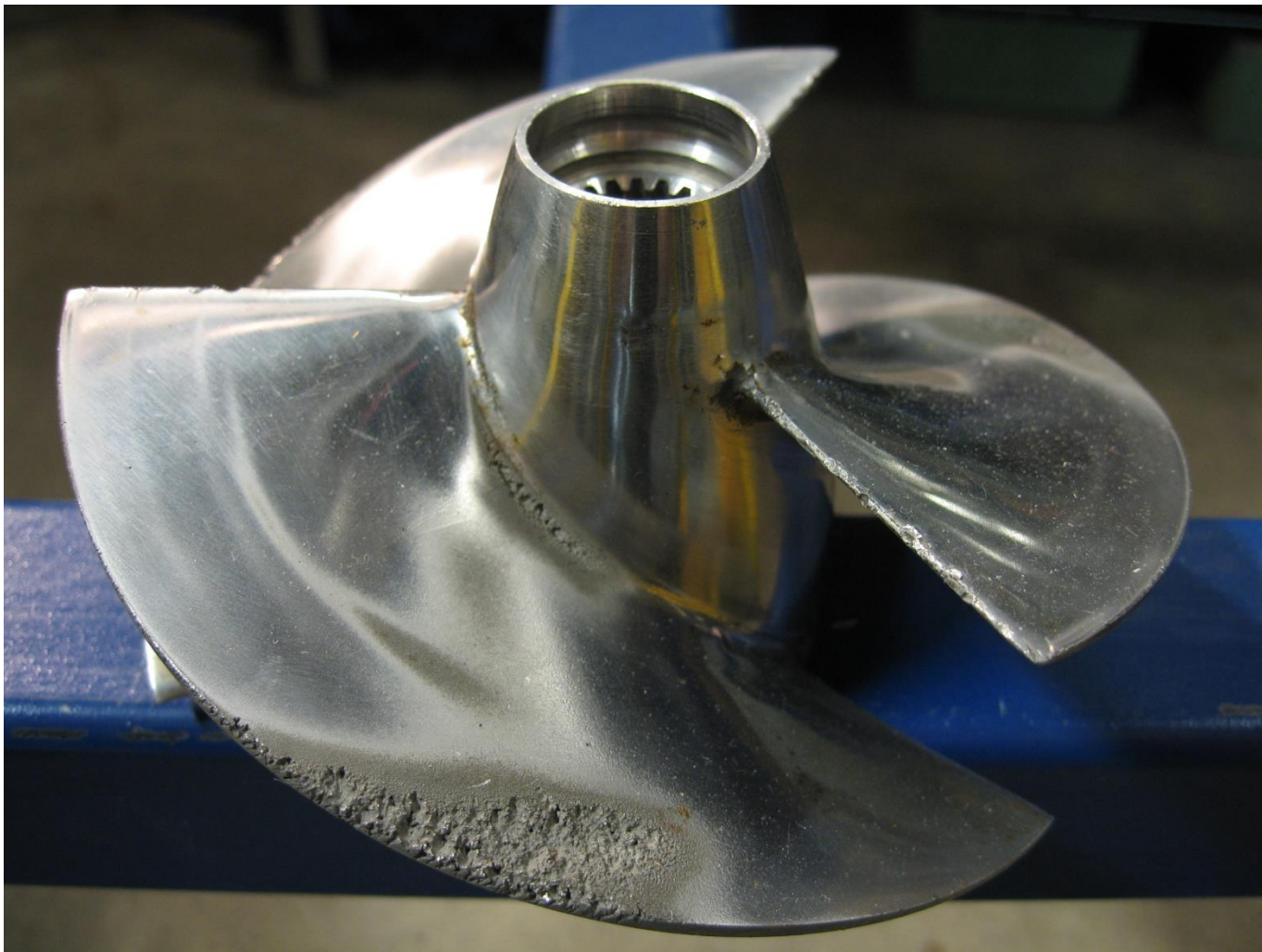
Pompa centrifuga

Sviluppo



Turbina ad elica

.....e danni della cavitazione



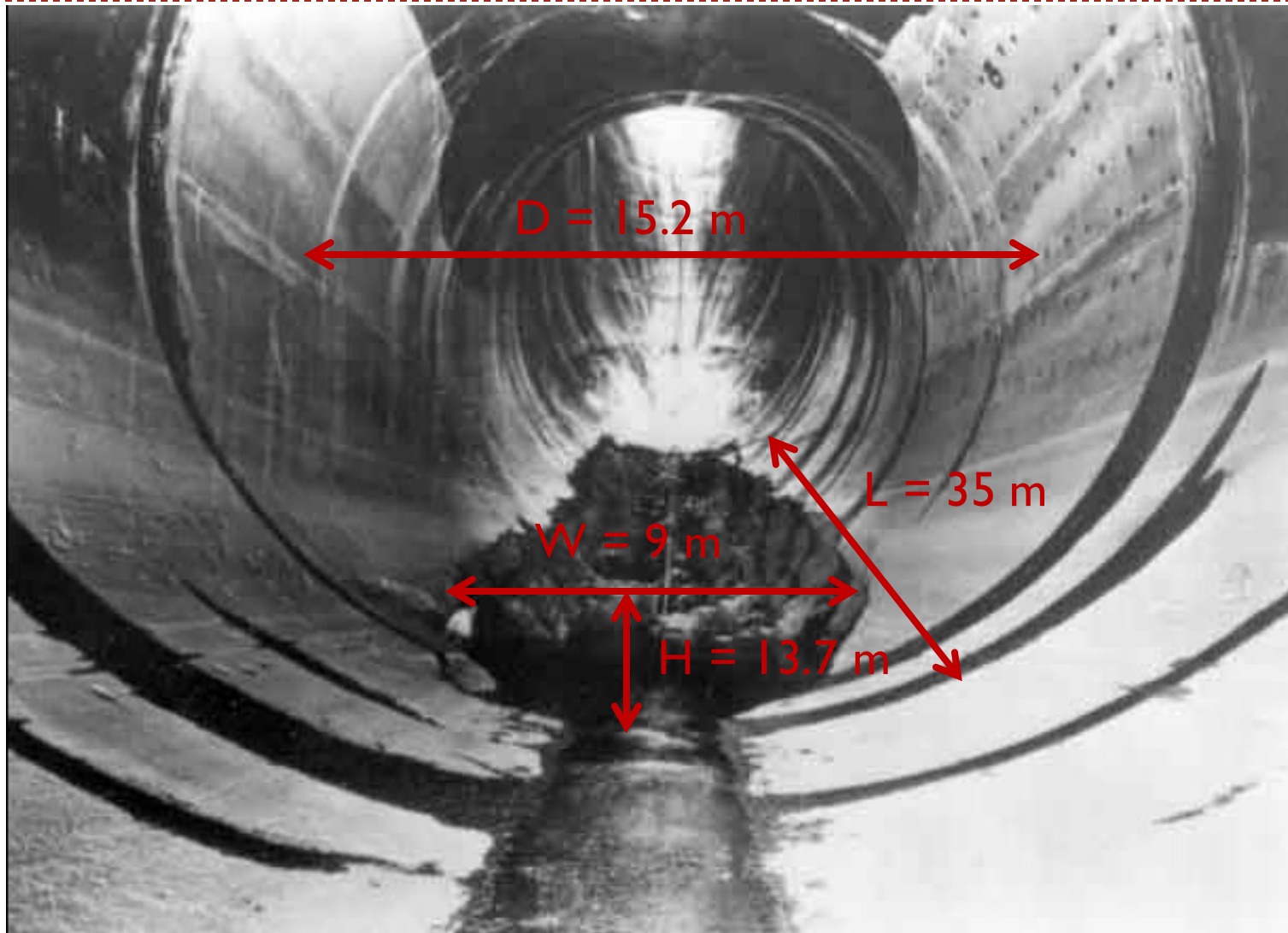
Turbina ad elica

.....e danni della cavitazione

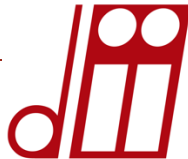


Pompa centrifuga

Non solo nelle turbomacchine



Condotta di un impianto



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)

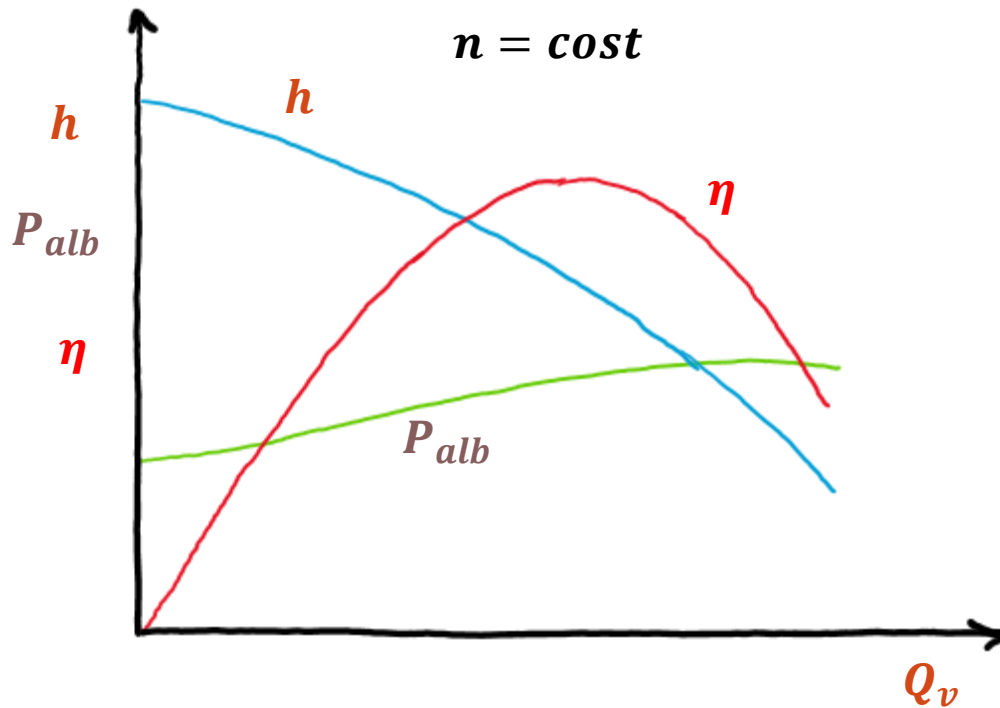
$$NPSH = \frac{p_i - p_v}{\rho g} + \frac{c_i^2}{2g}$$



La Cavitazione secondo il COSTRUTTORE

La cavitazione secondo il costruttore

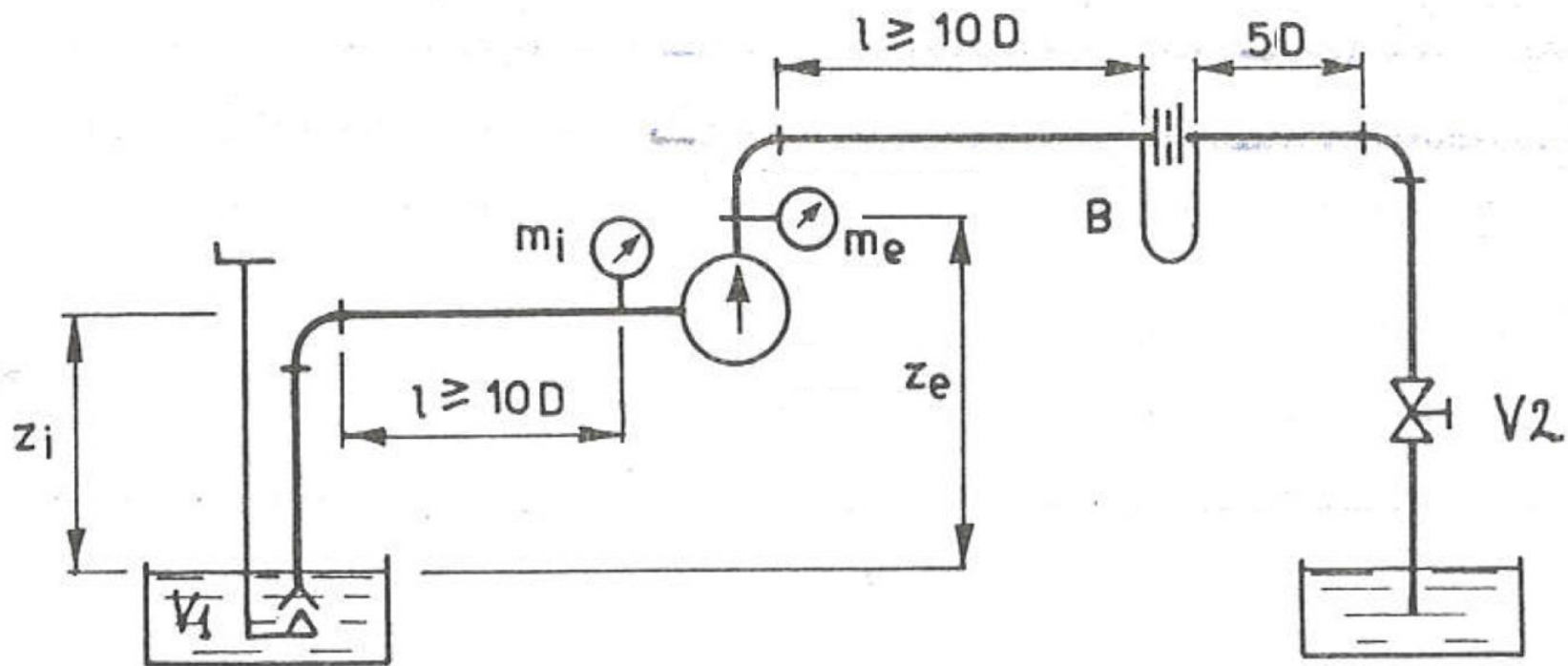
- Il collaudo di una pompa consente di determinare le curve caratteristiche delle prestazioni



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

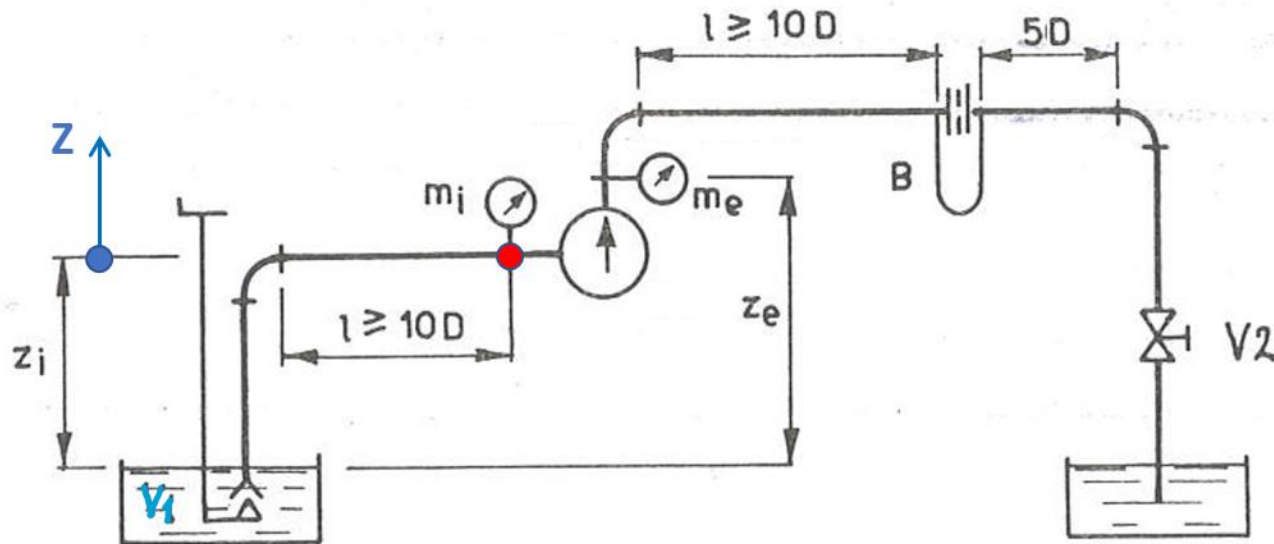
Se è un'energia del fluido



Dove è la componente z dell'energia??



La cavitazione secondo il costruttore

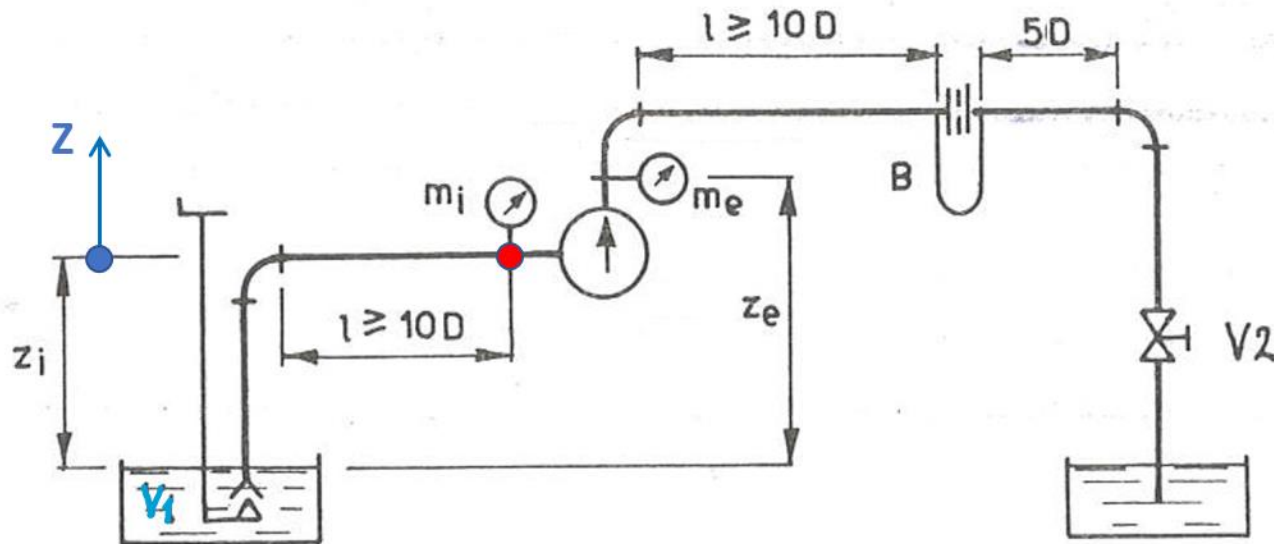


$$NPSH = \frac{p_i - p_v}{\rho g} + \frac{c_i^2}{2g}$$

- 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' $NPSH$

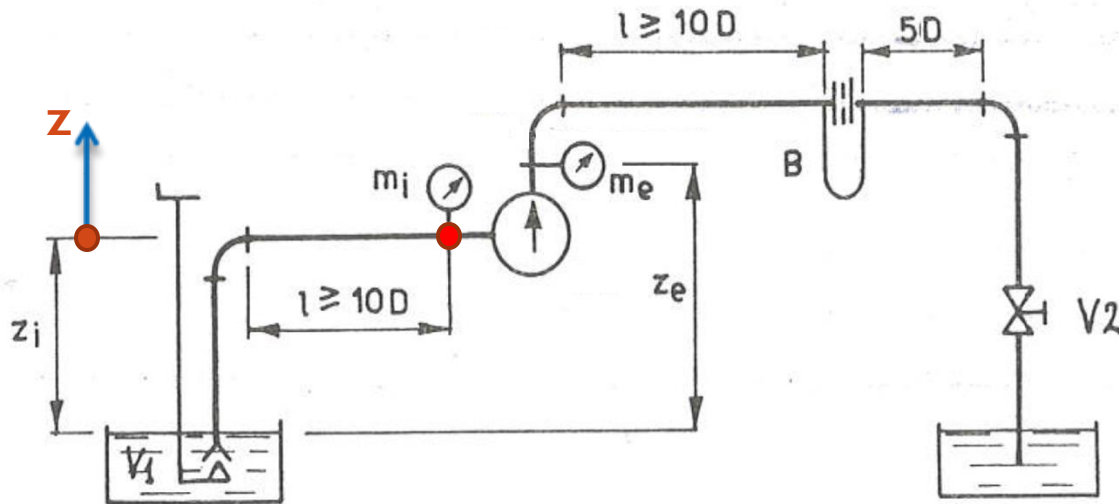


La cavitazione secondo il costruttore



- 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

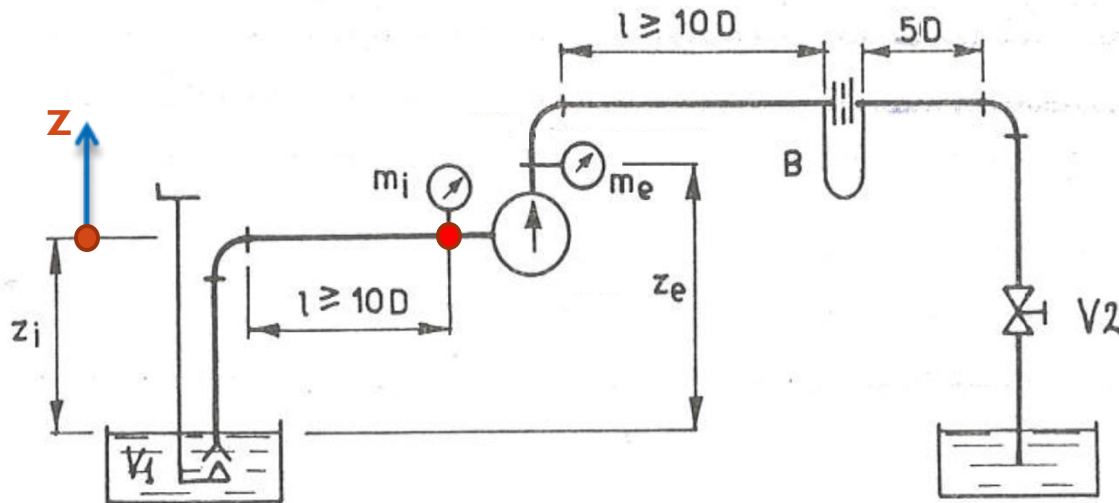
La cavitazione secondo il costruttore



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

- 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 chiusi**, la temperatura T_i deve essere tenuta costante durante le prove mediante un **scambiatore di calore posto a monte della pompa**

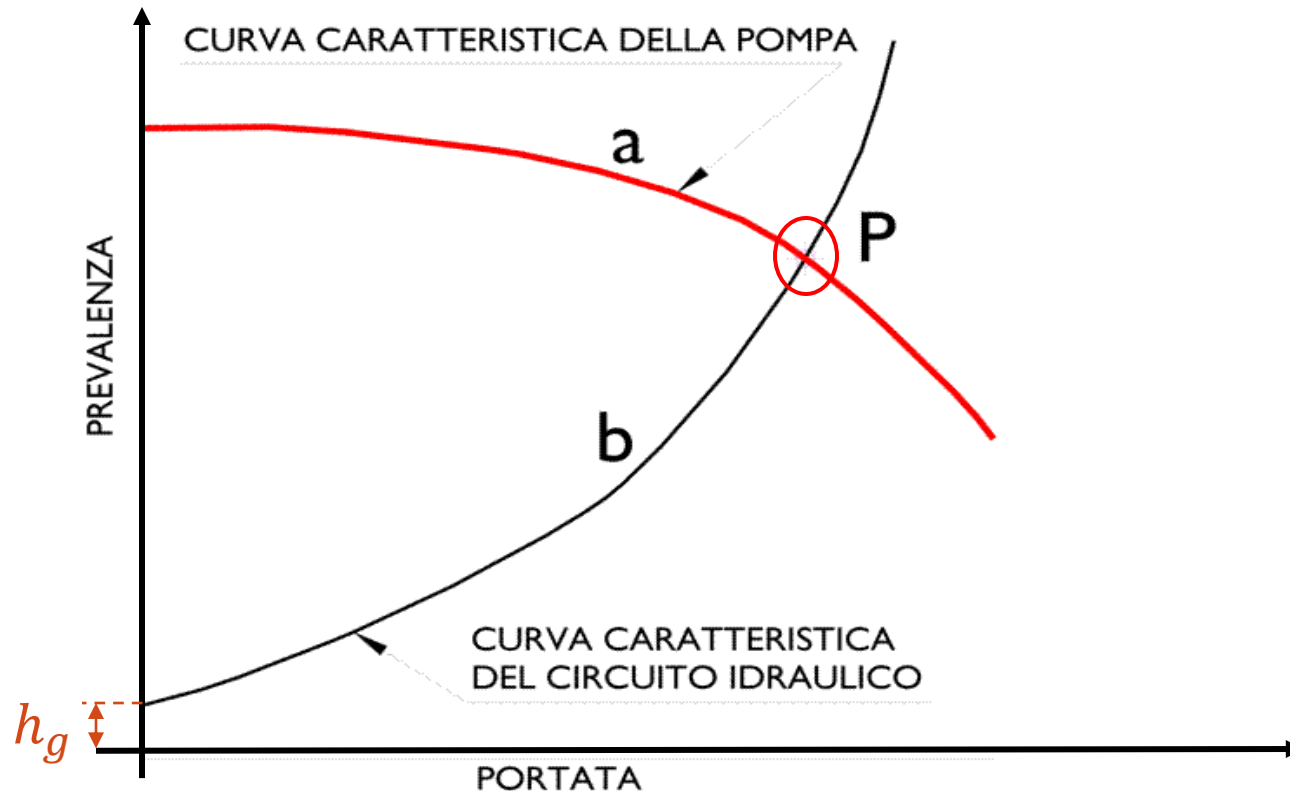
La cavitazione secondo il costruttore



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

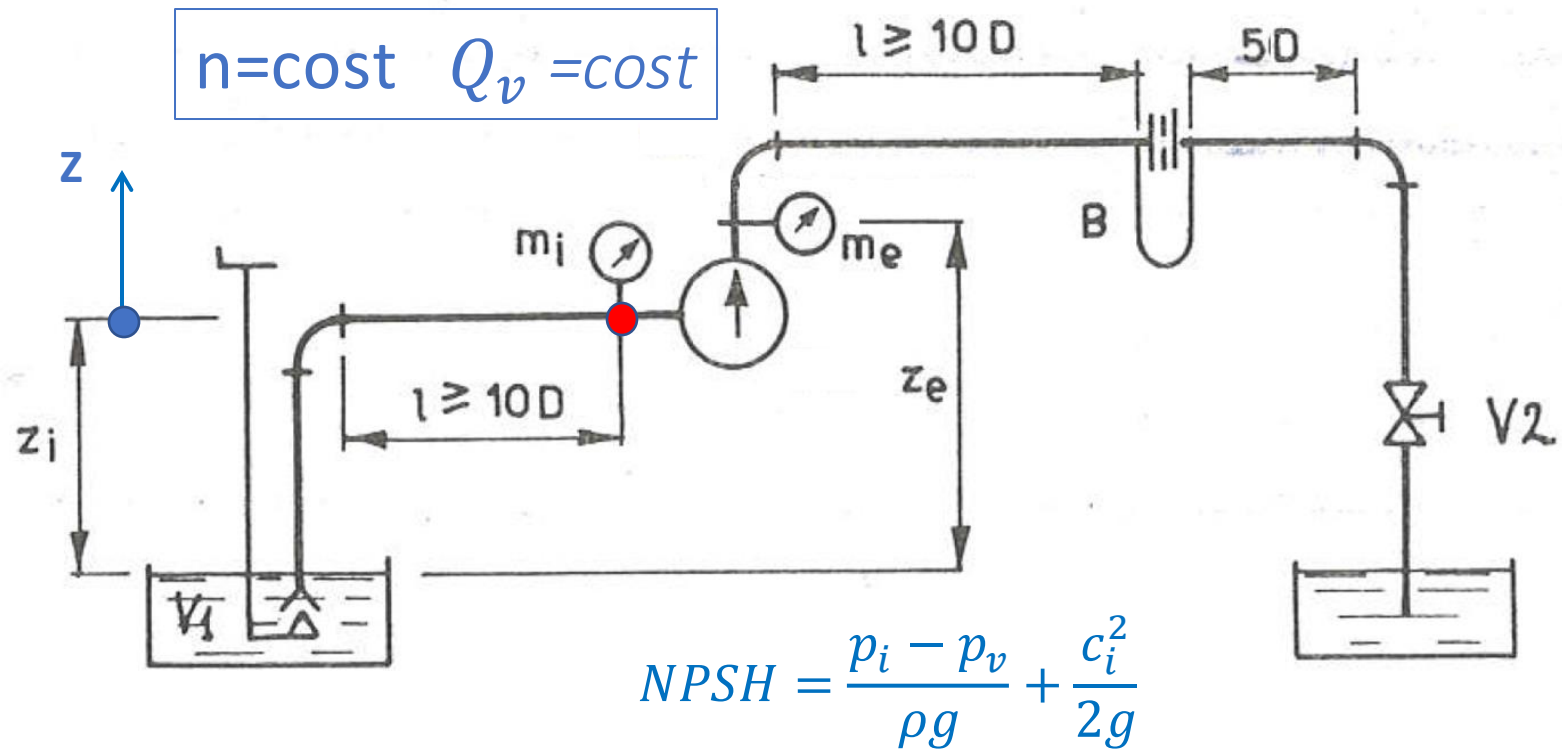
- Per un fissato regime di rotazione n e per una data portata Q_v , per determinare il corrispondente valore di $NPSH_R$ si deve ridurre la pressione statica all'aspirazione p_i introducendo delle perdite di carico a monte tramite la valvola V_1

La cavitazione secondo il costruttore



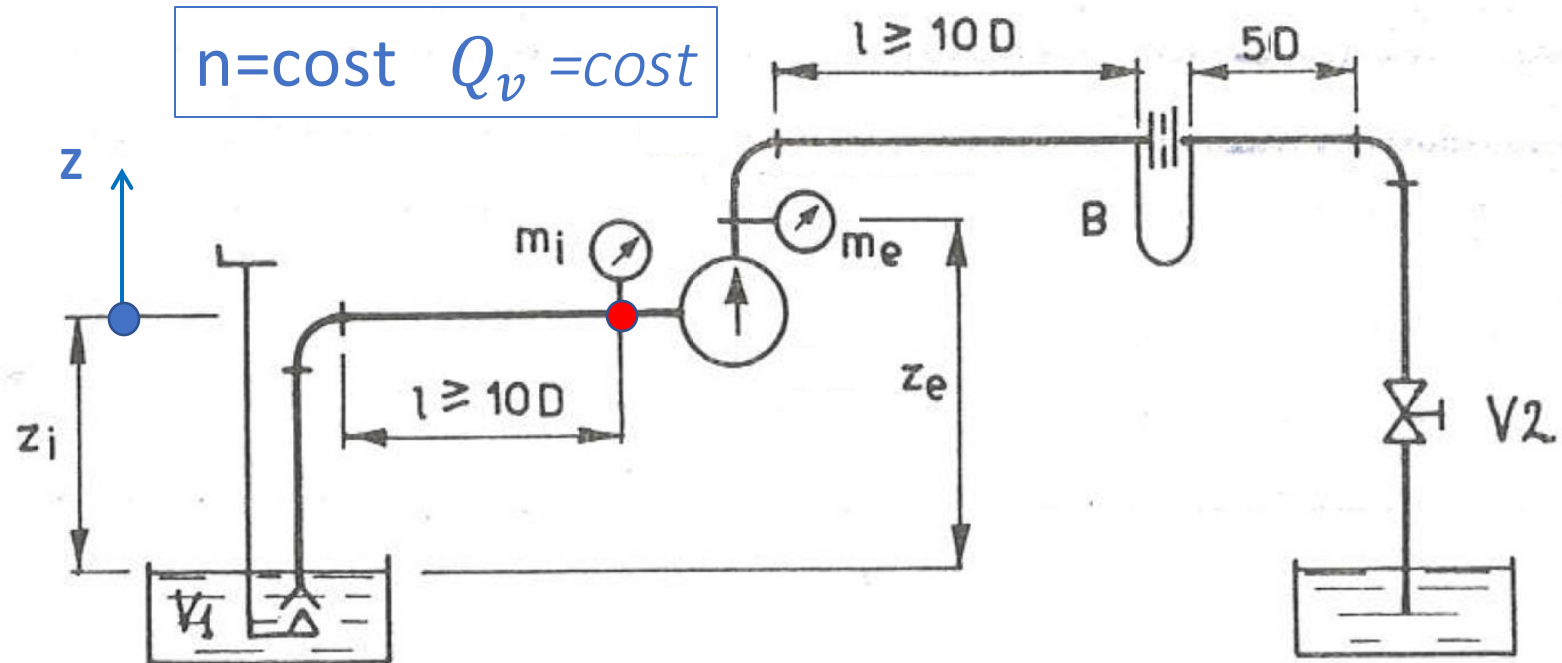
- Se si introducono perdite di carico, si varia anche la **caratteristica resistente** dell'impianto e quindi, per il carattere autoregolante della macchina, la portata Q_v varia

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

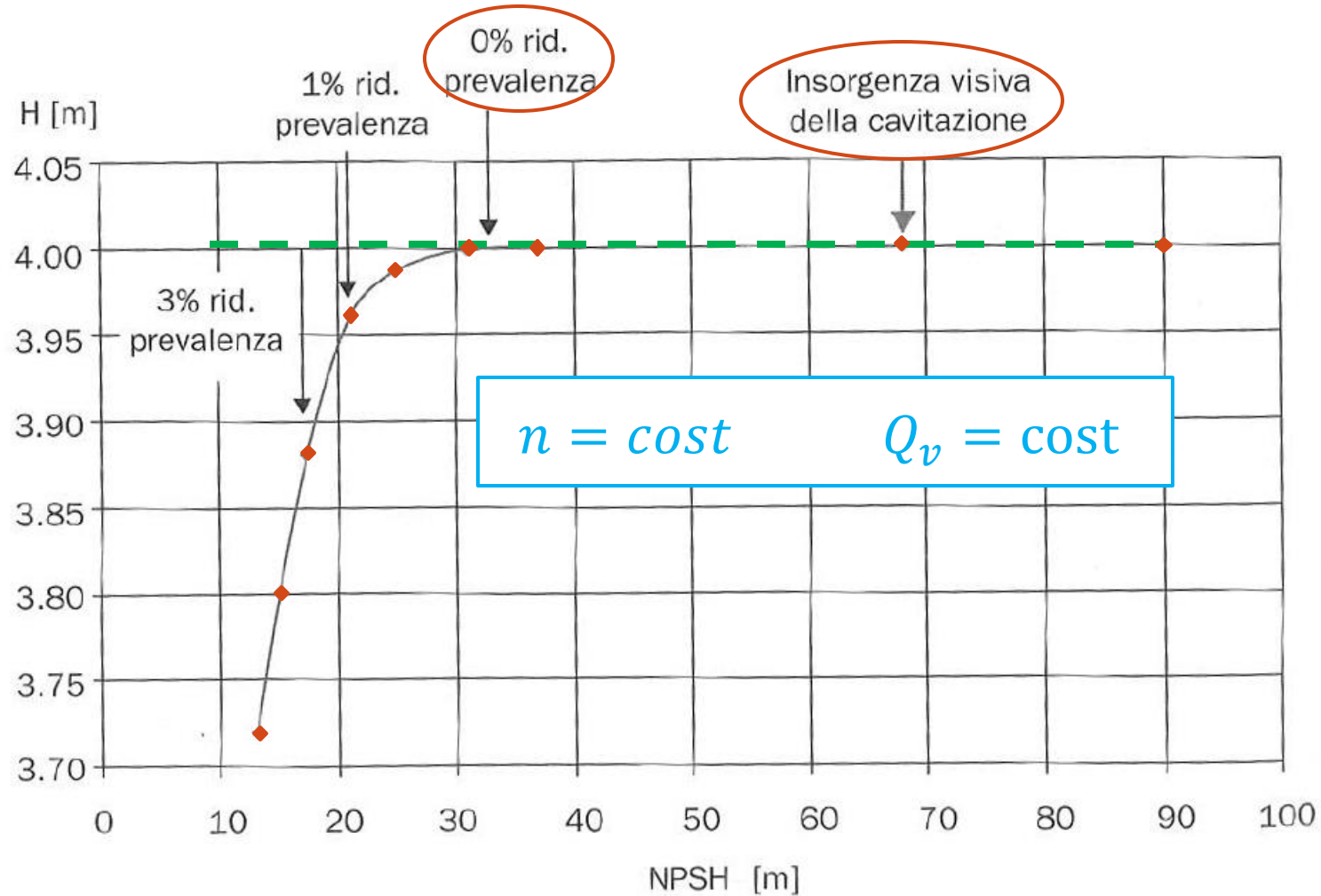


Al diminuire di p_i :

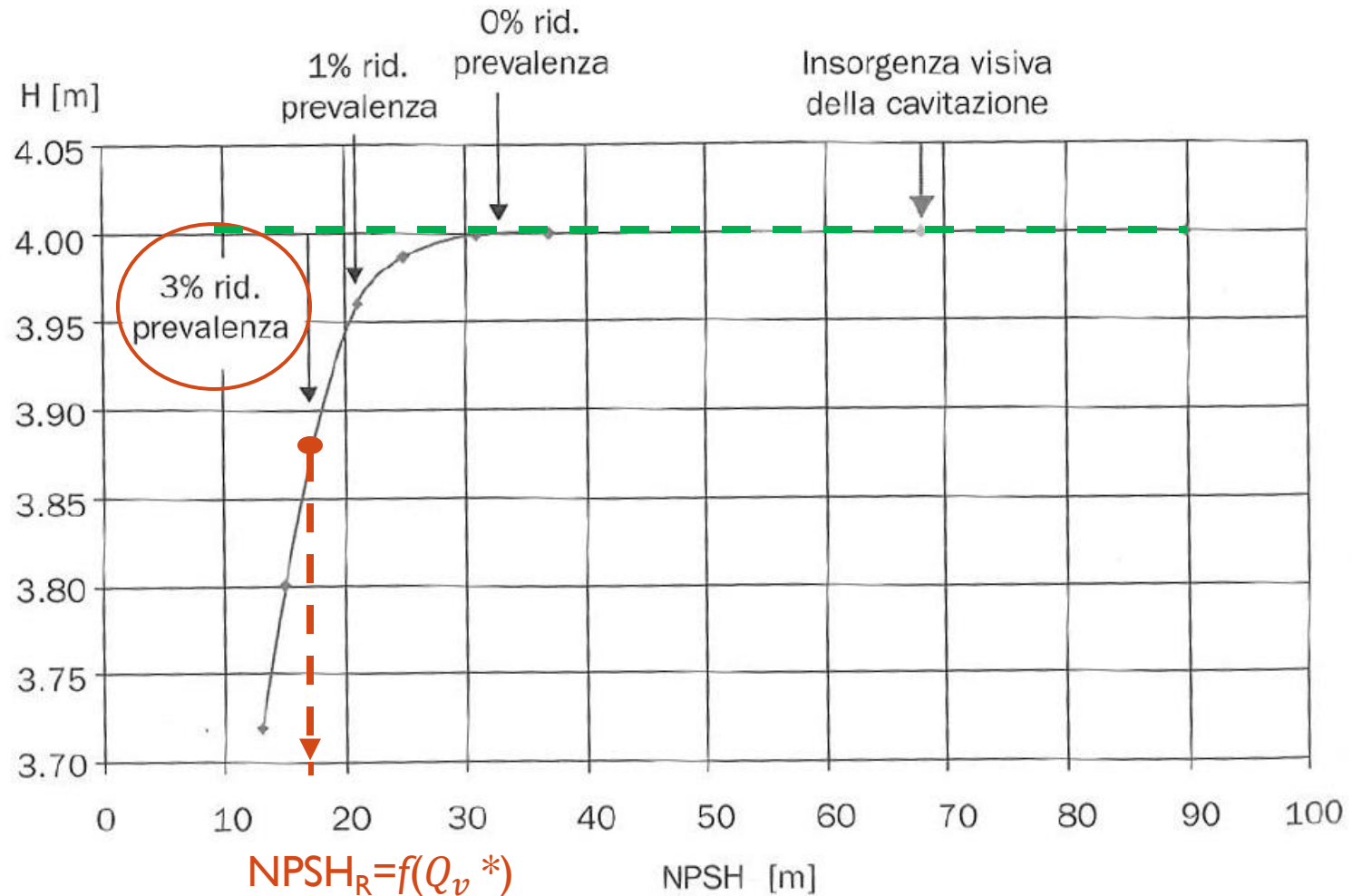
- si determina l' $NPSH$
- si misura la prevalenza h

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

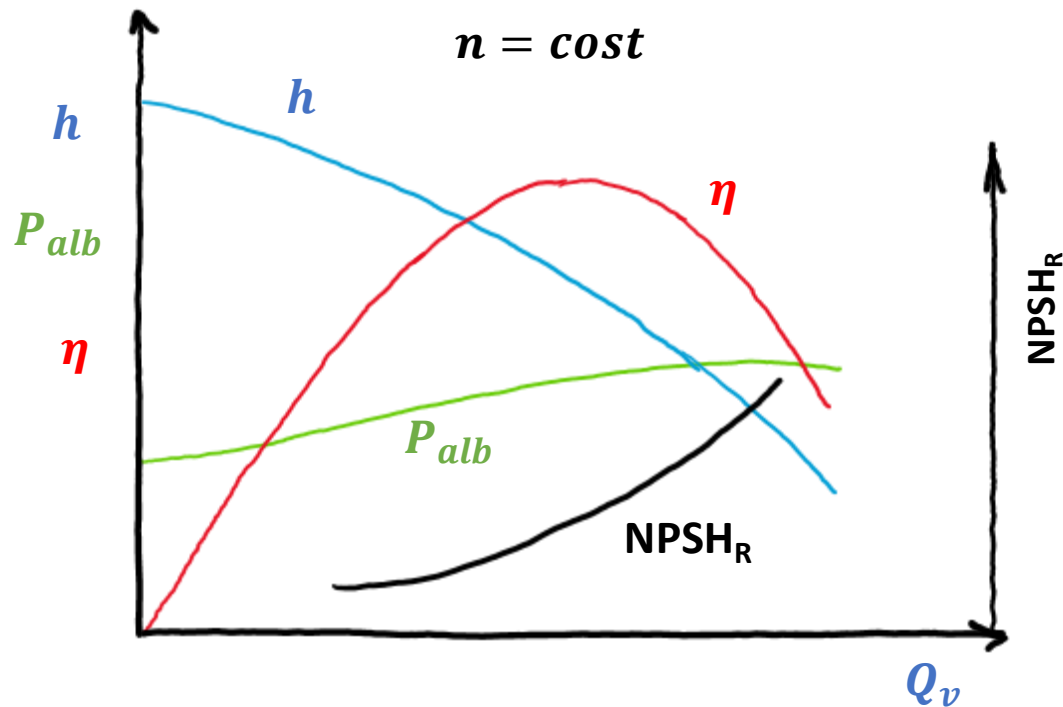
La cavitazione secondo il costruttore



La cavitazione secondo il costruttore

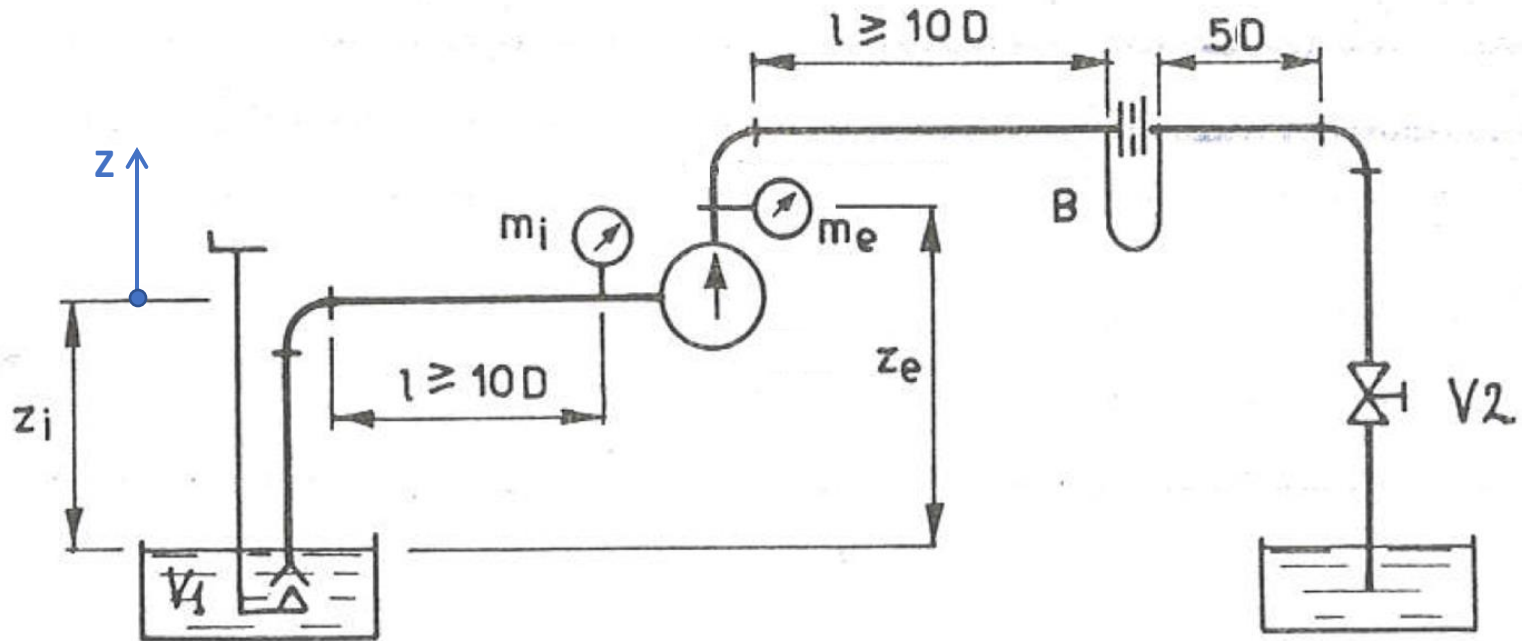


La cavitazione secondo il costruttore



Andamento tipico dell' $NPSH_R$ richiesto da una pompa per cavitare

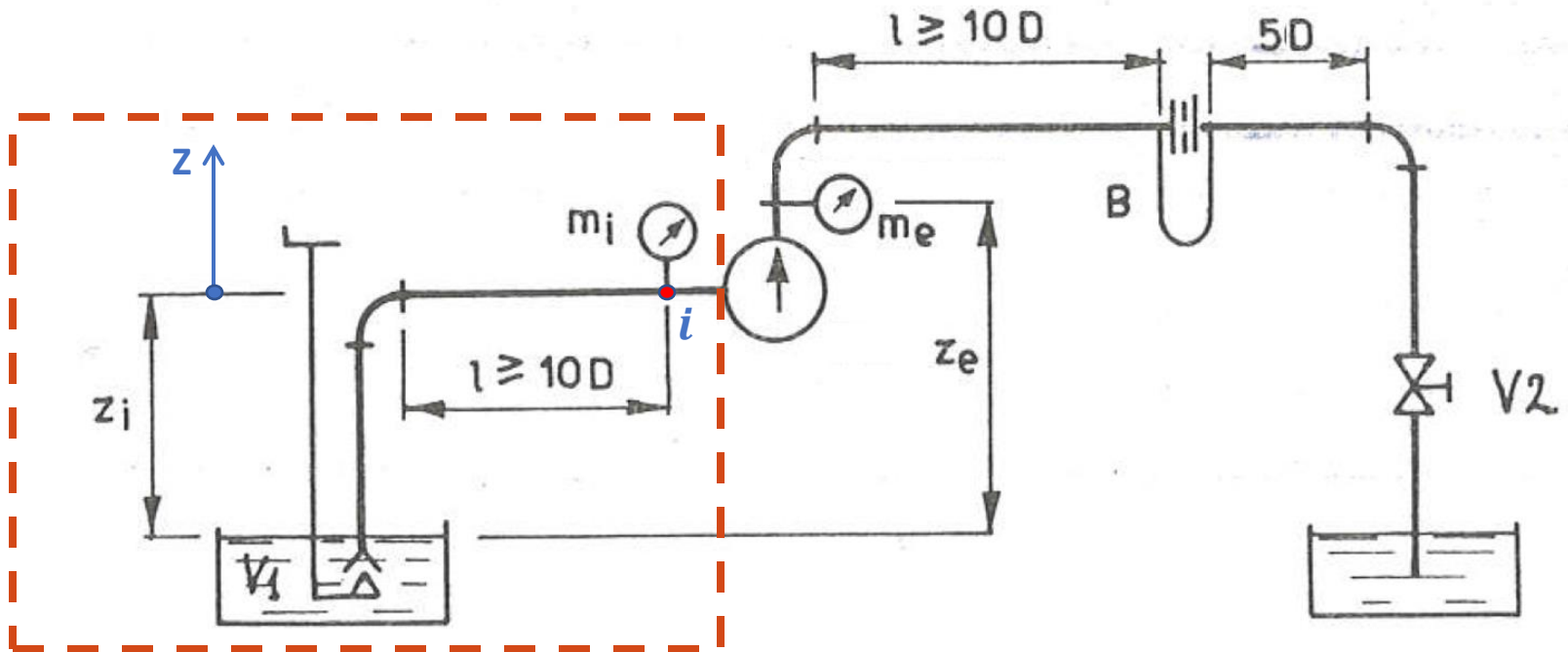
La cavitazione secondo l'utilizzatore



- 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

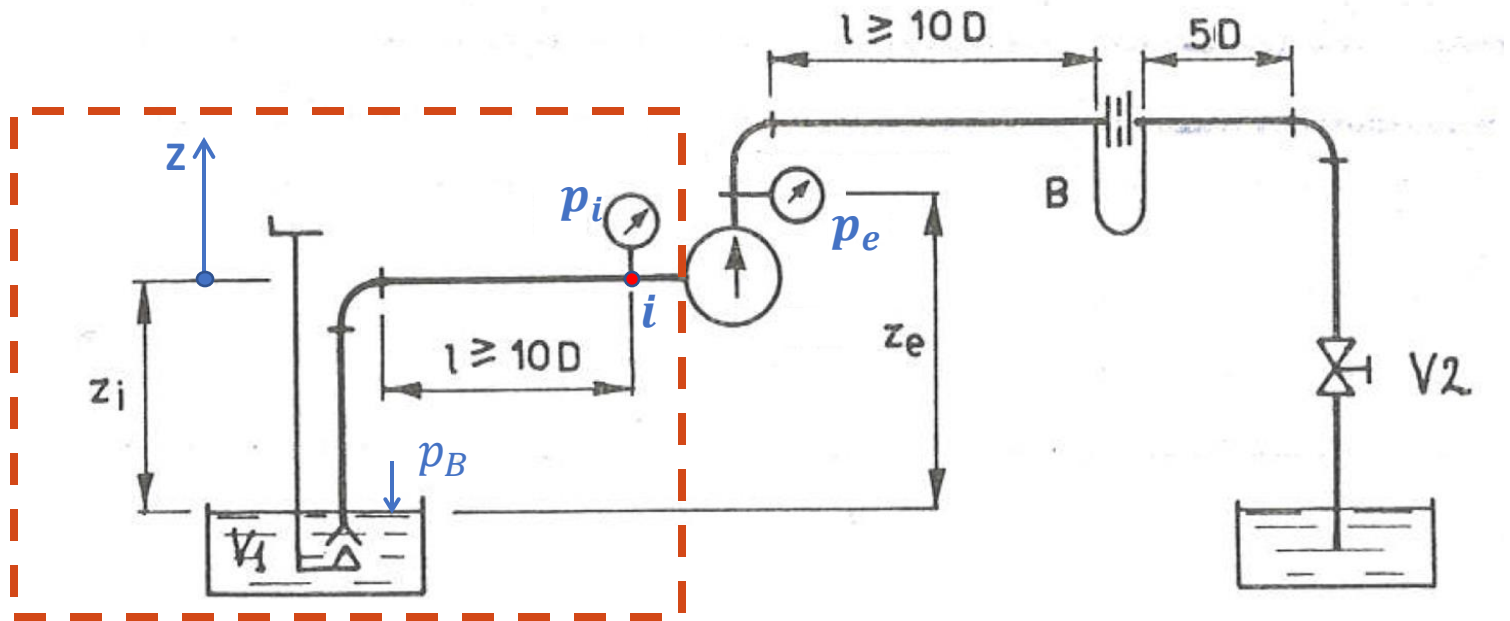
La Cavitazione secondo il UTILIZZATORE

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

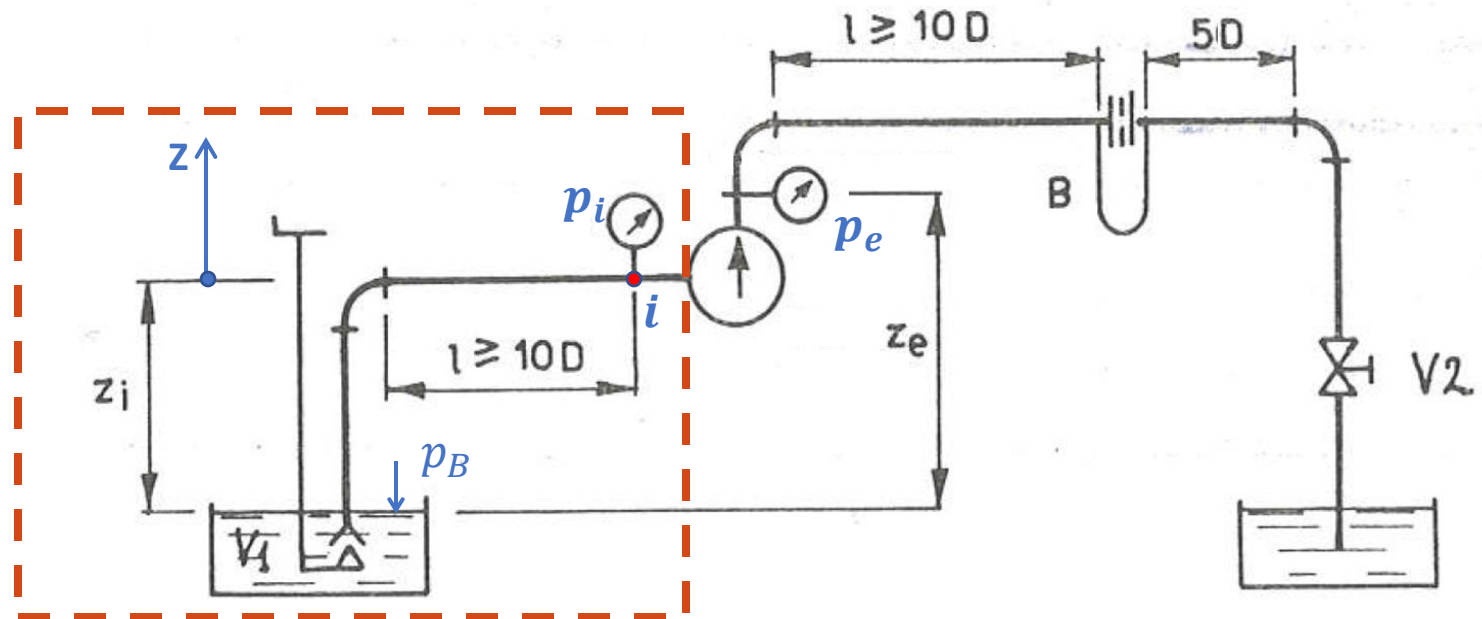
La cavitazione secondo l'utilizzatore



- 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:

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

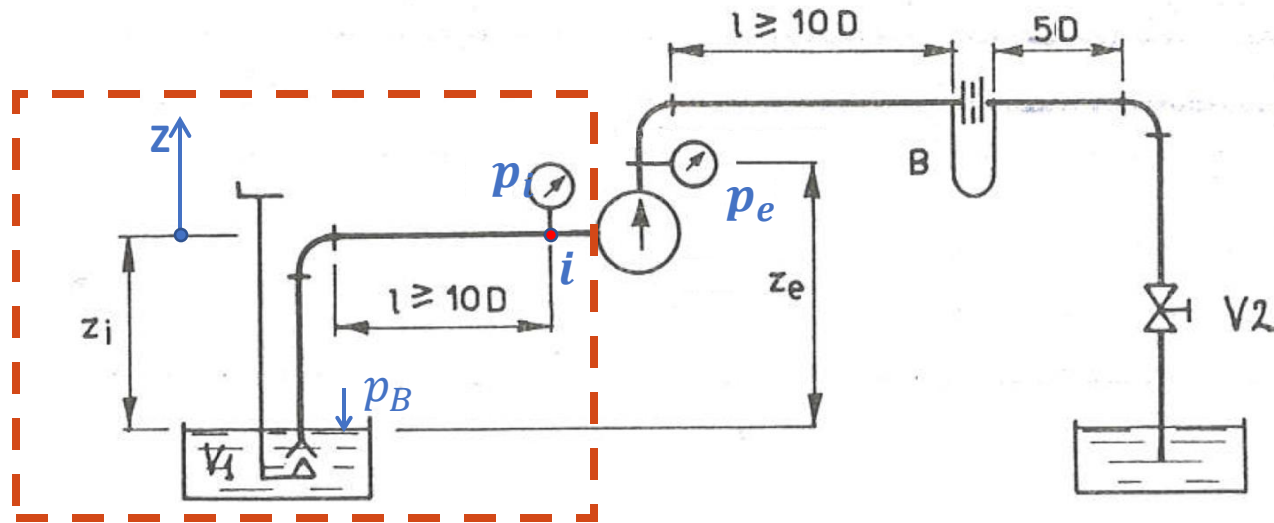
La cavitazione secondo l'utilizzatore



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

- 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

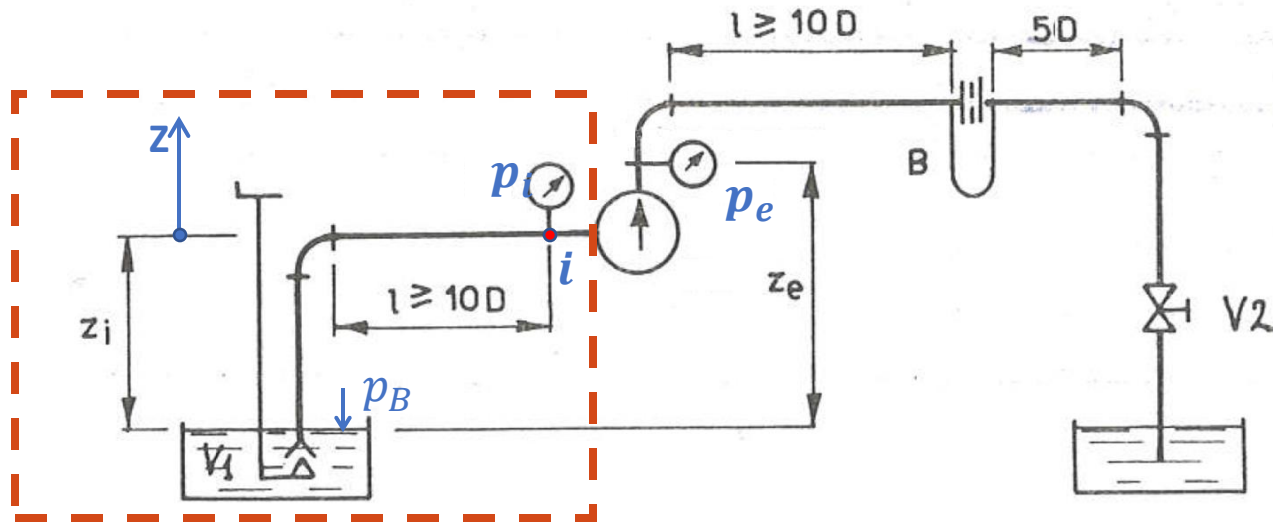
La cavitazione secondo l'utilizzatore



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

- 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

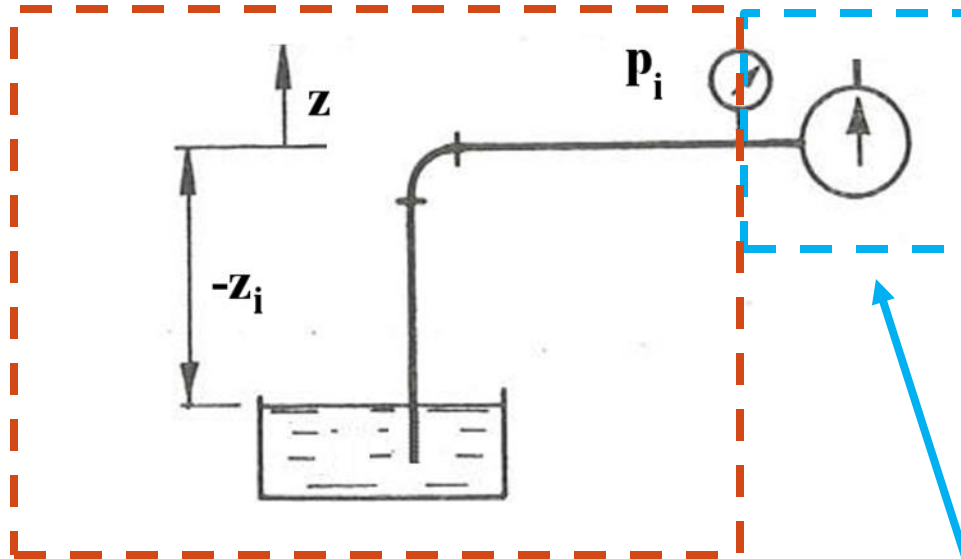


⇒ Si definisce **NPSH disponibile** dell'impianto la grandezza:

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

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

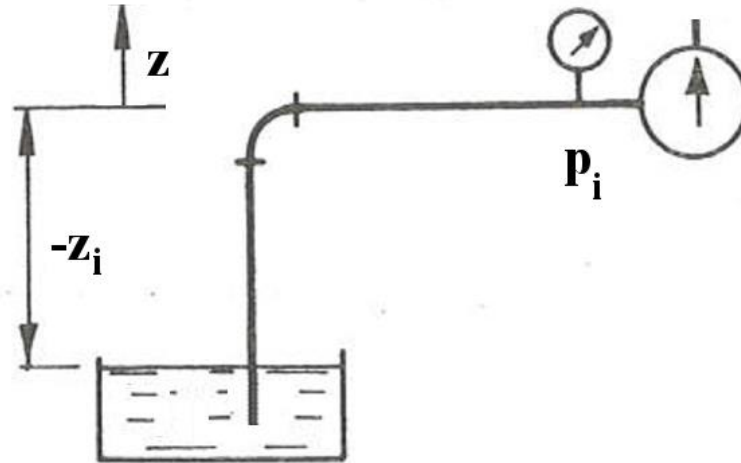
>

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

>

NPSH_R

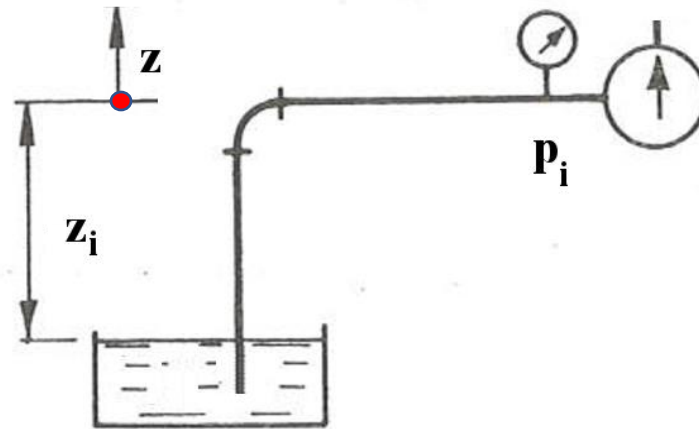
La cavitazione secondo l'utilizzatore



- 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

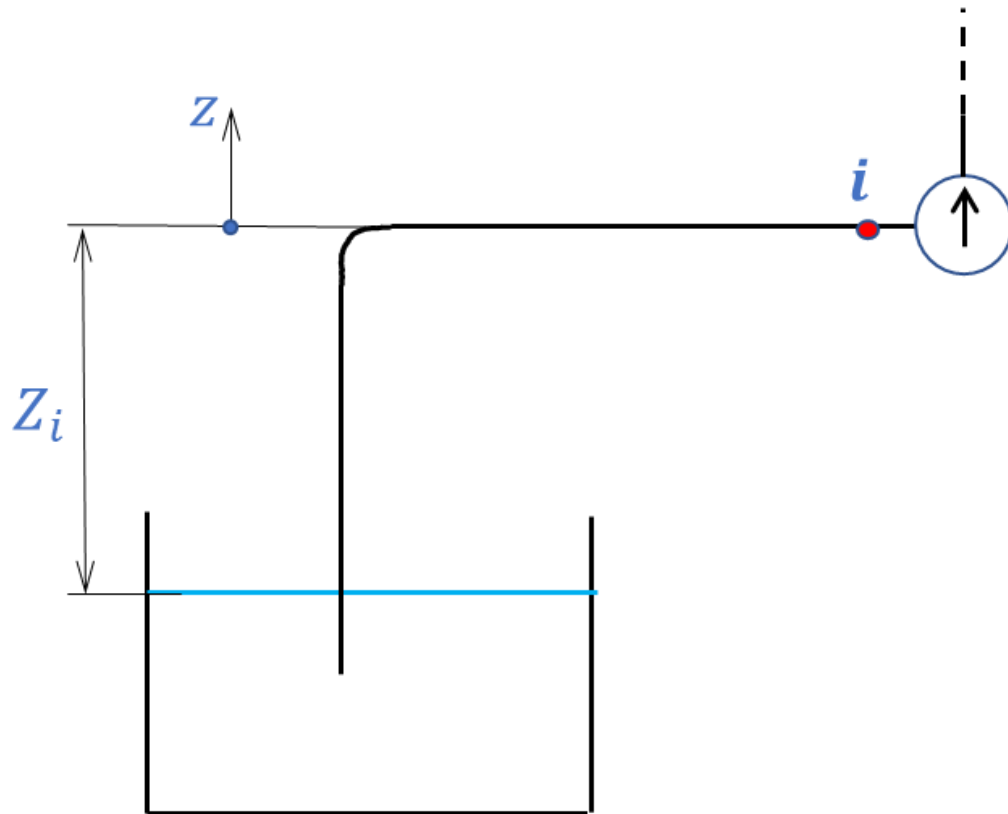


$$NPSH_D = \frac{p_B - p_v}{\rho g} - |Z_{limite}| - h_{ri} = NPSH_R + (0,7 \div 1) \rightarrow Z_{limite}$$

⇒ 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:

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

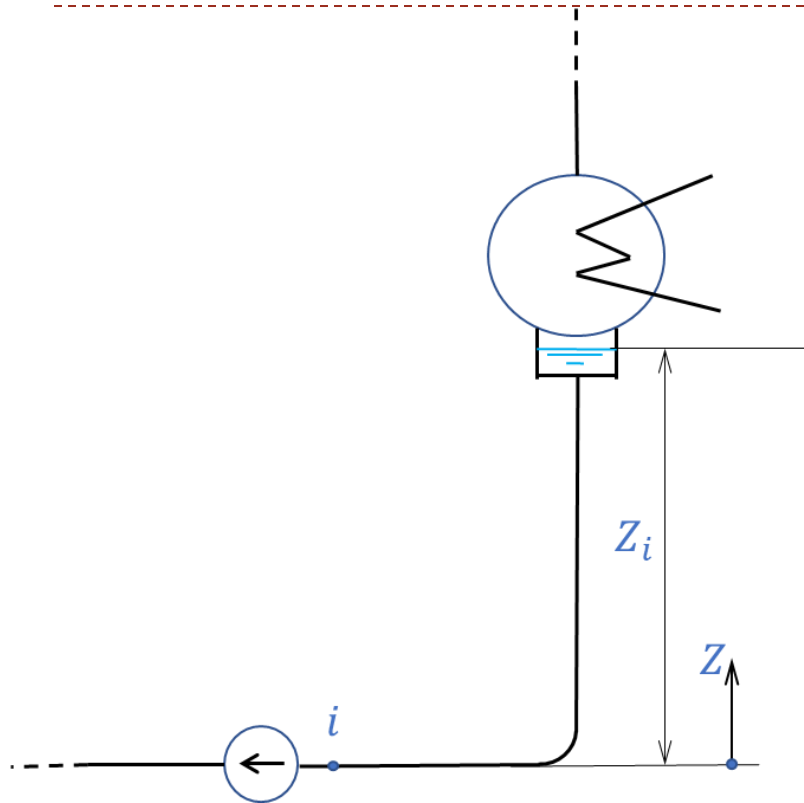
$$p_B = 101,3 \text{ kPa}$$

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

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

Determinare la quota Z_i a cui installare la pompa

Esercizio 2

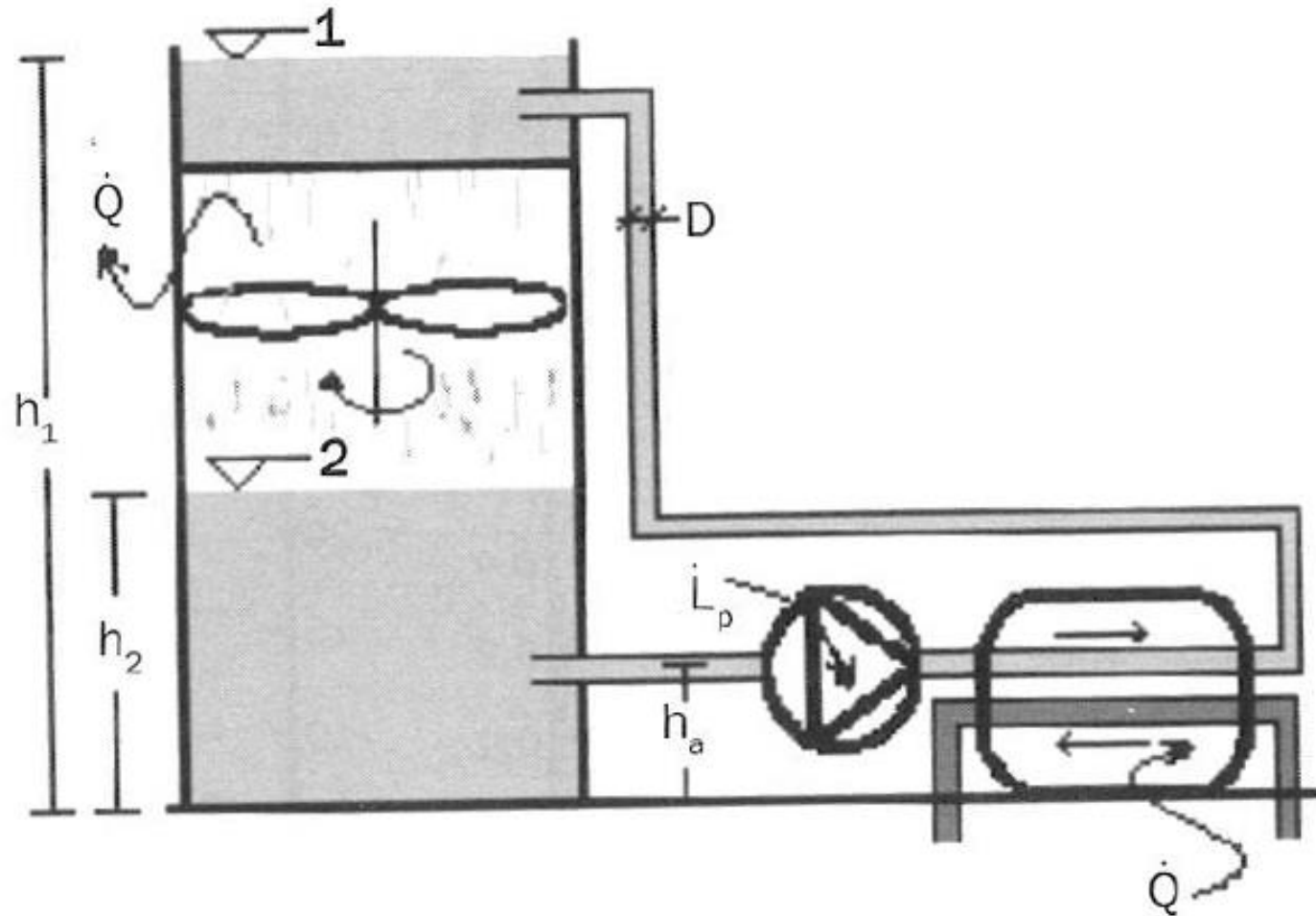


Si consideri una pompa per l'estrazione di condensato.

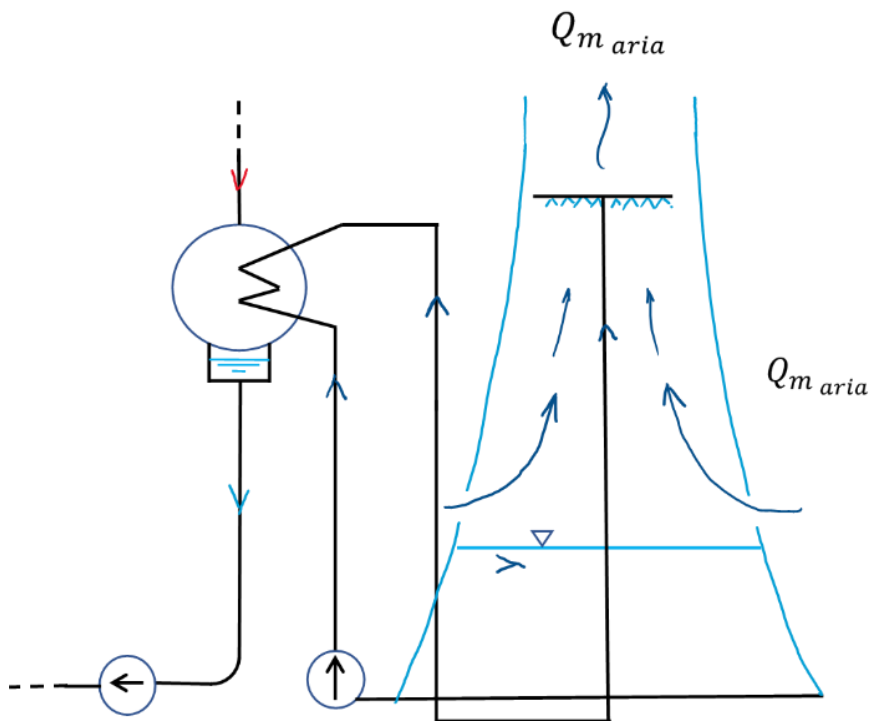
- Sia $Z_i = 3 \text{ m}$
- Si assumano pari a $0,8 \text{ m}$ le perdite di carico h_{ri} tra il pelo libero del condensato nel pozzetto caldo del condensatore e la sezione di ingresso i della pompa

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

Esercizio 3



Esercizio 3



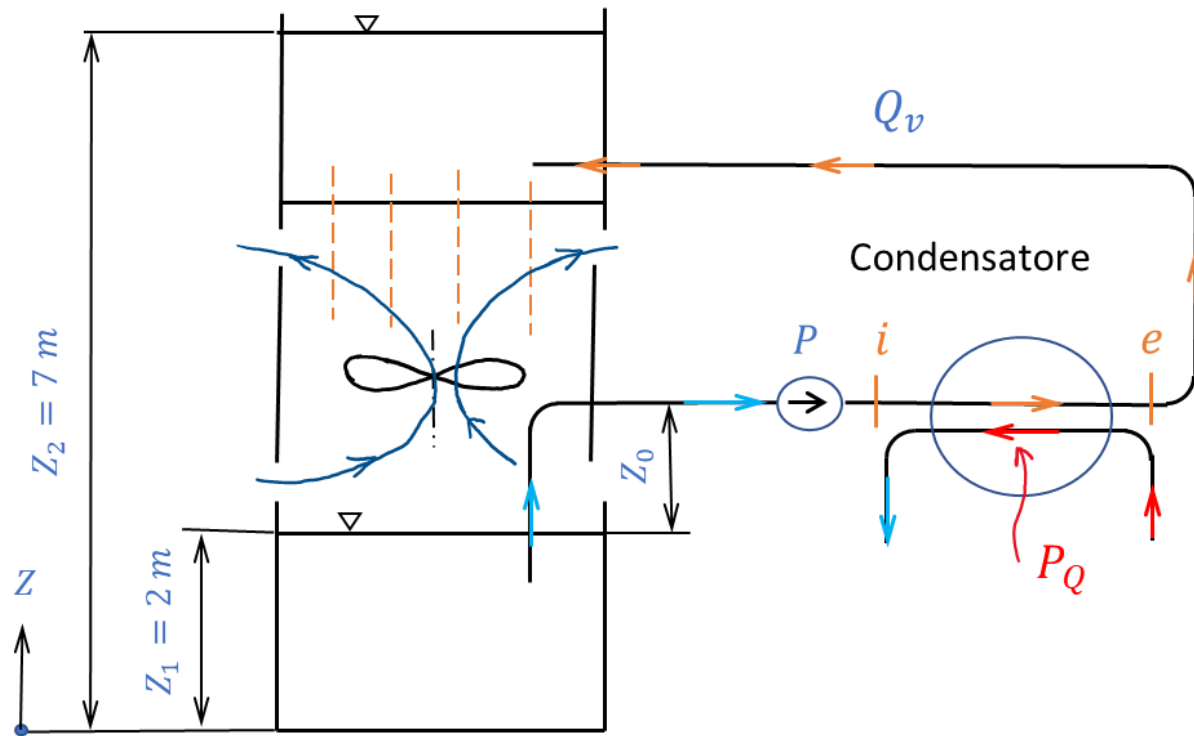
In figura è rappresentato l'apparato di raffreddamento (con torre evaporativa) dell'acqua condensatrice che scorre nei fasci tubieri del condensatore di un impianto a vapore

Si ricorre alla soluzione con torre evaporativa quando non si dispone di una adeguata disponibilità d'acqua nei dintorni dell'impianto, o per altri vincoli di sicurezza ambientale.

La pressione di condensazione p_c del vapore in questi impianti è solitamente non inferiore a $0,08\text{ bar}$, poiché in questi casi la sorgente fredda è l'aria dell'ambiente esterno.

Esercizio 3

La figura sottostante riporta uno schema semplificato del principio di funzionamento della torre evaporativa.

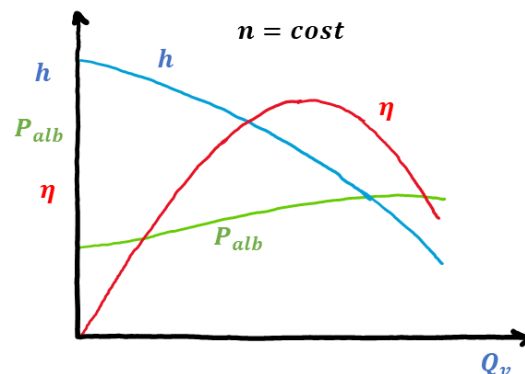


Esercizio 3

- La pompa per la circolazione dell'acqua condensatrice è collocata ad una quota Z_0 sopra il pelo libero del serbatoio inferiore di raccolta, il cui pelo libero è invece collocato ad una quota $Z_1 = 2 \text{ m}$ rispetto al riferimento.
- Il pelo libero del serbatoio superiore che raccoglie l'acqua condensatrice all'uscita del condensatore è collocato a una quota pari a $Z_2 = 7 \text{ m}$.
- Per semplicità, si supponga che le curve caratteristiche $h \text{ [m]}$ e $\eta \text{ [-]}$ in funzione di $Q_v \text{ [m}^3\text{/s]}$ siano deducibili dall'equazioni:

$$h = 26 + 2 Q_v - 85 Q_v^2$$

$$\eta = 2,93 Q_v - 2,85 Q_v^2$$



Esercizio 3

- Il diametro dei tubi sia pari a $D_{tubi} = 300 \text{ mm}$ e per le perdite di carico compressive (continue e localizzate) si faccia riferimento alle seguenti relazioni per i tratti del circuito idraulico a monte e a valle della pompa:

$$\sum_{monte} \left(f \frac{l}{d} + \xi \right) \frac{C^2}{2g} = \zeta_{monte} \frac{C_{monte}^2}{2g} = 2 \frac{C_{monte}^2}{2g}$$

$$\sum_{valle} \left(f \frac{l}{d} + \xi \right) \frac{C^2}{2g} = \zeta_{valle} \frac{C_{valle}^2}{2g} = 3 \frac{C_{valle}^2}{2g}$$

- Si assumano nei calcoli le seguenti costanti ove necessario
- Densità dell'acqua $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$
 - Accelerazione di gravità $g = 9.806 \text{ m/s}^2$
 - Calore specifico a pressione costante del liquido $C_{p,L} = 4.186 \text{ kJ/kg K}$



Esercizio 3

Si richiede di calcolare:

- 1) la potenza assorbita dalla pompa
- 2) Il salto di temperatura ΔT dell'acqua condensatrice attraverso il condensatore se la potenza termica asportata è $P_Q = 15 \text{ MW}$
- 3) la quota di installazione massima della pompa di circolazione dell'acqua condensatrice sapendo che: $NPSH_R = 3 \text{ m}$ e $p_{cond} = p_v = 0,04 \text{ bar} = 0,04 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

La Cavitazione secondo il PROGETTISTA

La cavitazione secondo il progettista

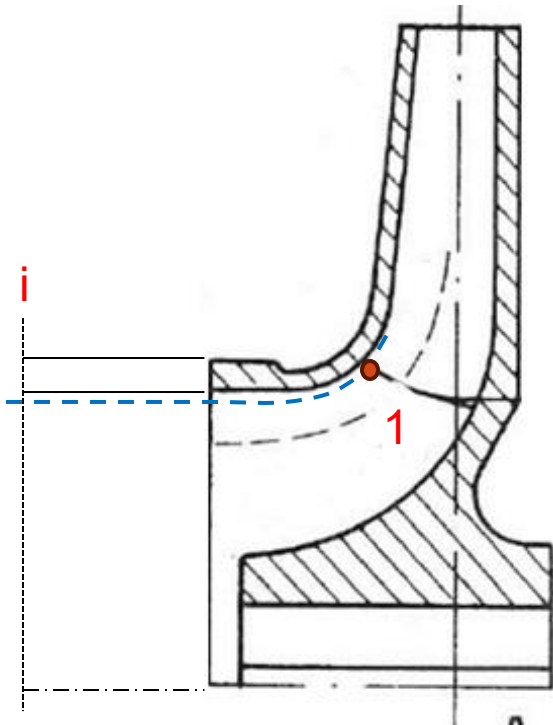
- Il **progettista** deve controllare in sede di progetto il comportamento a cavitazione della macchina
- Il parametro che esprime le prestazioni della macchina rispetto alla cavitazione è:

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

⇒ Si deve individuare una relazione per legare l' $NPSH_R$ ai parametri di progetto della macchina che lo influenzano

- L' $NPSH_R$ è definito rispetto alla sezione i in quanto, in fase di collaudo, i valori di pressione e velocità in questa sezione sono facilmente misurabili e/o determinabili. Questa sezione però non corrisponde alla sezione di minima pressione all'interno della macchina.

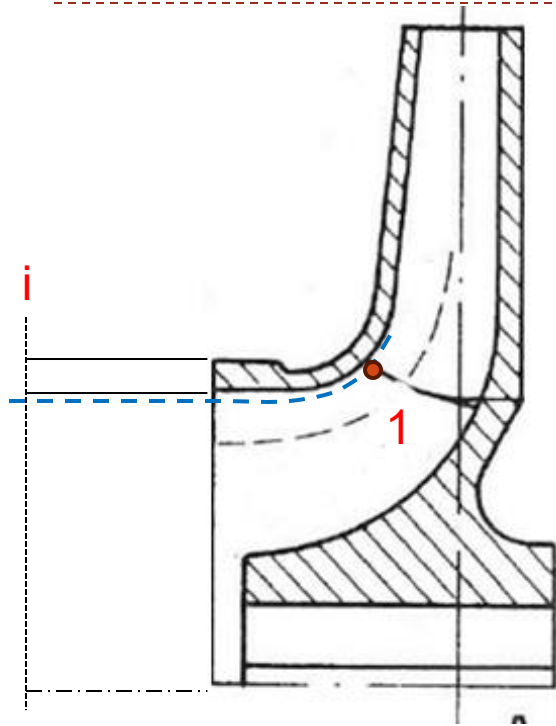
La cavitazione secondo il progettista



- Il fenomeno della cavitazione comincia a svilupparsi all'interno della macchina poco a valle del bordo d'ingresso, nel punto di minima pressione statica all'ingresso del condotto interpalare (sezione 1)
- In particolare la regione più critica è a ridosso del disco di ricoprimento perché la velocità meridiana C_m (per effetto del raggio di curvatura), la velocità periferica $U = \omega r$ e quindi anche la velocità relativa W sono quelle più elevate lungo lo sviluppo del bordo d'ingresso

- Dal momento che la cavitazione in fase di collaudo è valutata facendo riferimento alla sezione di misura i , si rende necessario correlare tale sezione con il punto di insorgenza della cavitazione all'interno della macchina

La cavitazione secondo il progettista



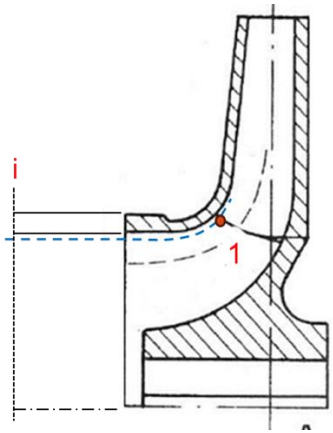
- Durante questo tragitto dalla sezione *i* alla sezione **1** non c'è scambio di energia con la girante pertanto, a meno delle perdite di carico, l'energia del fluido si conserva lungo il tubo di flusso:

$$\frac{p_i}{\rho g} + \frac{C_i^2}{2g} = \frac{p_1}{\rho g} + \frac{C_1^2}{2g} + h_{r i-1}$$

- Le energie che compaiono nell'equazione sono da intendersi come valori medi in direzione circonferenziale

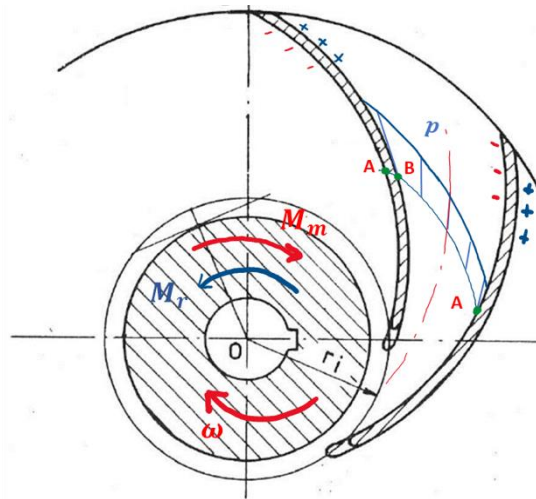
- Se nella sezione *i* i valori medi sono sufficientemente rappresentativi del comportamento del fluido, nella sezione **1** si è invece avuto modo di dimostrare l'esistenza di un gradiente di pressione in direzione circonferenziale
- Determiniamo i vari termini a sinistra dell'equazione

La cavitazione secondo il progettista



- Per la **conservazione**, a meno delle perdite fluidodinamiche, dell'**energia** totale p_w^0/ρ del moto relativo, è possibile **correlare** le caratteristiche **medie** del moto **relativo** con quelle del moto a **ridosso** della faccia in **depressione** della pala:

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{W_1^2 - U_1^2}{2g} \approx \frac{p_{min}}{\rho g} + \frac{W_{max}^2 - U_1^2}{2g}$$

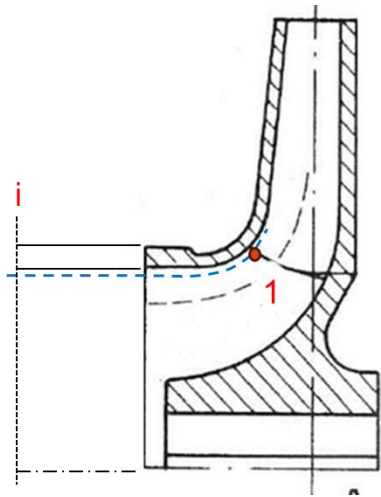


$$\Rightarrow \frac{p_1}{\rho g} = \frac{p_{min}}{\rho g} + \frac{W_1^2}{2g} \left(\frac{W_{max}^2}{W_1^2} - 1 \right) = \frac{p_{min}}{\rho g} + \lambda_w \frac{W_1^2}{2g}$$

coefficiente di depressione **idro**dinamica

$$\frac{p_1}{\rho g} = \frac{p_{min}}{\rho g} + \lambda_w \frac{W_1^2}{2g}$$

La cavitazione secondo il progettista



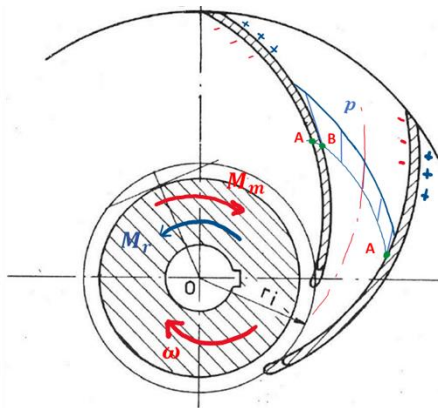
$$\frac{p_i}{\rho g} + \frac{C_i^2}{2g} = \frac{p_1}{\rho g} + \frac{C_1^2}{2g} + \boxed{h_{r_{i-1}}}$$

$$\frac{p_1}{\rho g} = \frac{p_{min}}{\rho g} + \lambda_w \frac{W_1^2}{2g}$$

- Le perdite di carico $h_{r_{i-1}}$ nel tragitto tra la sezione di misura i e la sezione 1 a monte del bordo d'ingresso sono legate alla velocità
- Posto $C_{u_1} = 0$ a monte della girante e dunque $C_1 = C_{m_1}$, le perdite di carico $h_{r_{i-1}}$ si possono esprimere come:

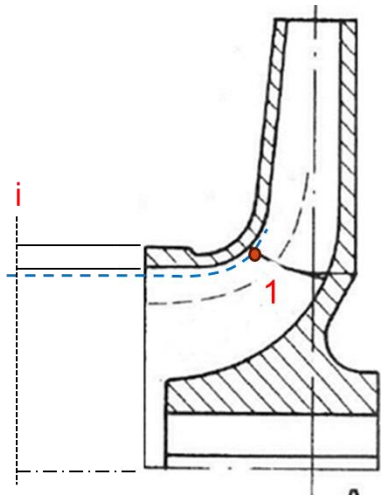
$$h_{r_{i-1}} = \lambda_m \frac{C_{m_1}^2}{2g}$$

Coefficiente di perdita



$$\text{Allora } \frac{p_i}{\rho g} + \frac{C_i^2}{2g} = \frac{p_{min}}{\rho g} + \lambda_w \frac{W_1^2}{2g} + (1 + \lambda_m) \frac{C_{m_1}^2}{2g}$$

La cavitazione secondo il progettista



$$\frac{p_i}{\rho g} + \frac{C_i^2}{2g} = \frac{p_{min}}{\rho g} + \lambda_w \frac{W_1^2}{2g} + (1 + \lambda_m) \frac{C_{m1}^2}{2g}$$

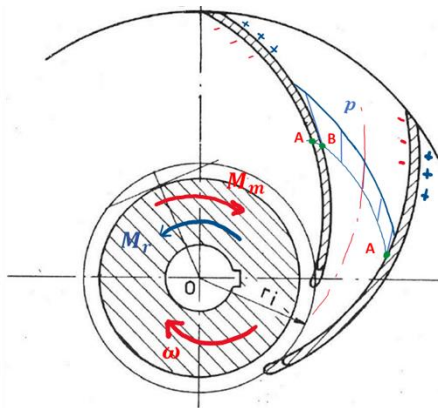
- Questa relazione tra la sezione *i* e la sezione 1 è **sempre** valida. Tuttavia il progettista è interessato al comportamento a **cavitazione** della macchina per poterlo correlare con parametri di progetto
- La cavitazione si sviluppa quando $p_{min} = p_v$ (condizioni di cavitazione incipiente) in cui la relazione diventa:

$$\frac{p_i}{\rho g} + \frac{C_i^2}{2g} = \frac{p_v}{\rho g} + \lambda_w \frac{W_1^2}{2g} + (1 + \lambda_m) \frac{C_{m1}^2}{2g}$$

$NPSH_i$



$$\boxed{\frac{p_i - p_v}{\rho g} + \frac{C_i^2}{2g}} = (1 + \lambda_m) \frac{C_{m1}^2}{2g} + \lambda_w \frac{W_1^2}{2g}$$



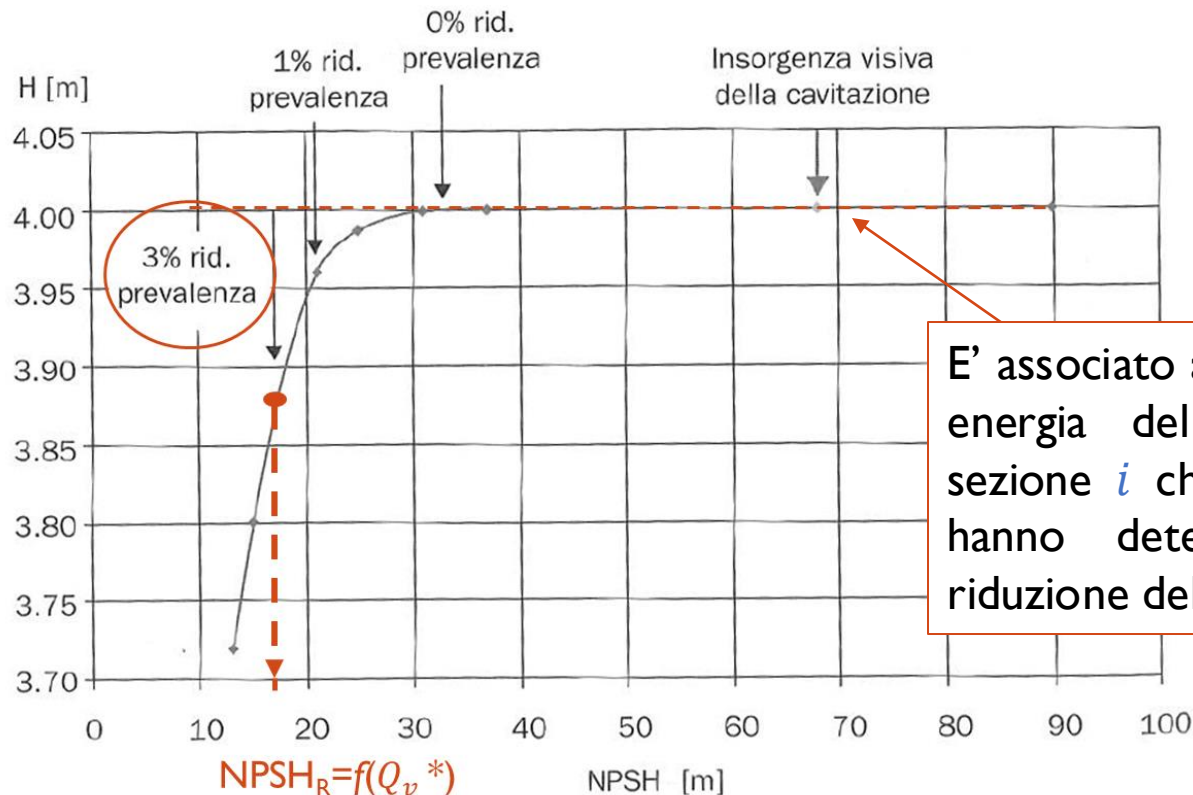
La cavitazione secondo il progettista

$$NPSH_i = (1 + \lambda_m) \frac{C_{m1}^2}{2g} + \lambda_w \frac{W_1^2}{2g}$$

E' quindi associato all'insorgenza della cavitazione all'interno della macchina

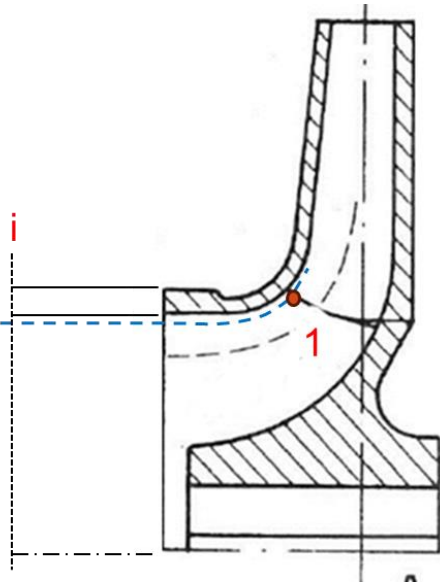
Coincide con l' $NPSH_R$?

NO!



E' associato a condizioni di energia del fluido nella sezione i che ancora non hanno determinato una riduzione della prevalenza

La cavitazione secondo il progettista

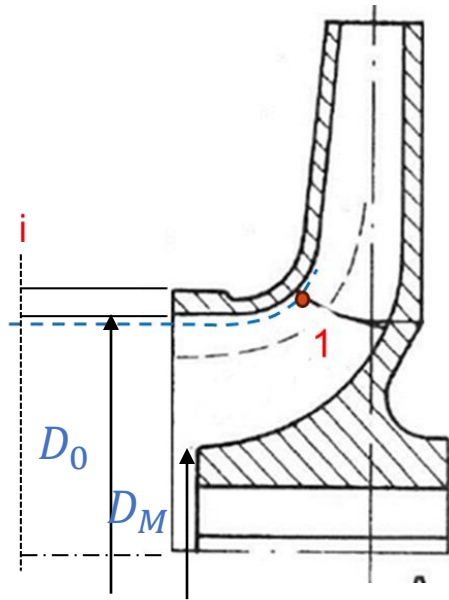


$$NPSH_i = (1 + \lambda_m) \frac{C_{m1}^2}{2g} + \lambda_w \frac{W_1^2}{2g}$$

- L'espressione dell' $NPSH_i$ può **anche** essere utilizzata per stimare l' $NPSH_R$ richiesta dalla macchina con una **opportuna** scelta dei coefficienti λ_m e λ_w per approssimare il dato sperimentale
- A tal riguardo, i **valori medi** suggeriti in letteratura per il coefficiente di perdita λ_m e per il coefficiente di azione idrodinamica delle pale λ_w sono all'incirca:

$$\lambda_m \approx 0,04 \quad \lambda_w \approx 0,23$$

Scelta del diametro D_0



- E' anche correlabile con parametri di progetto ed operativi della macchina:

$$NPSH_i = (1 + \lambda_m) \frac{C_{m1}^2}{2g} + \lambda_w \frac{W_1^2}{2g} = f(\text{geom. pompa}, Q_v, n)$$

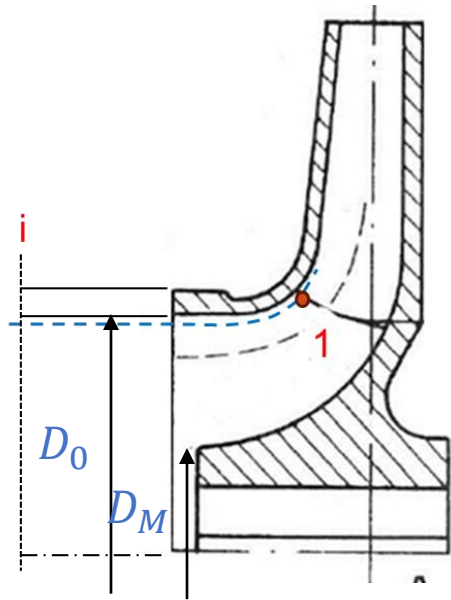
- Tra i parametri geometrici uno dei più importanti è il diametro D_0 della bocca di aspirazione della girante
- A tal riguardo l'espressione dell' $NPSH$ può essere riscritta in forma più opportuna nel modo seguente:

$$NPSH_i = (1 + \lambda_m) \frac{C_{m1}^2}{2g} + \lambda_w \frac{W_1^2}{2g} = (1 + \lambda_m + \lambda_w) \frac{C_{m1}^2}{2g} + \lambda_w \frac{U_1^2}{2g}$$

dove:

$$W_1^2 = C_{m1}^2 + U_1^2$$

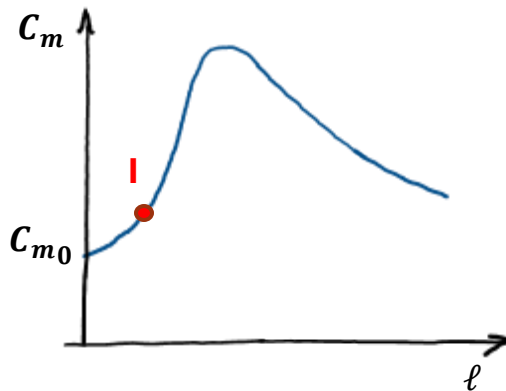
Scelta del diametro D_0



$$NPSH_i = (1 + \lambda_m + \lambda_w) \frac{C_{m1}^2}{2g} + \lambda_w \frac{U_1^2}{2g}$$

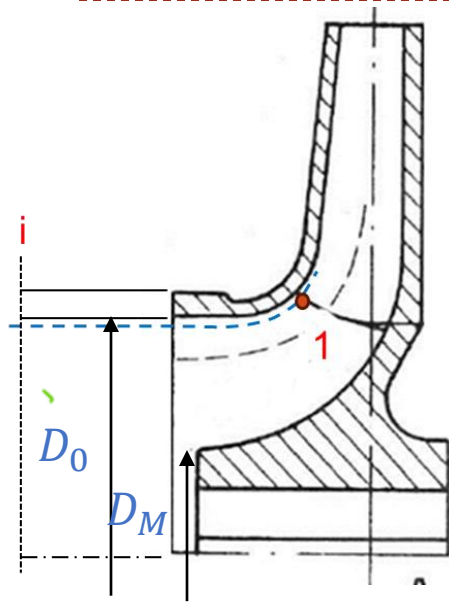
$$C_{m1} = k_m C_{m0} = k_m \frac{Q_v}{\eta_v A_0} = k_m \frac{4 Q_v}{\eta_v \pi D_0^2 \left[1 - \left(\frac{D_M}{D_0} \right)^2 \right]}$$

ξ_0



$$C_{m1} = k_m \frac{4 Q_v}{\eta_v \pi \xi_0 D_0^2}$$

Scelta del diametro D_0



$$NPSH_i = (1 + \lambda_m + \lambda_w) \frac{C_{m1}^2}{2g} + \lambda_w \frac{U_1^2}{2g}$$

$$C_{m1} = k_m \frac{4 Q_v}{\eta_v \pi D_0^2 \xi_0}$$

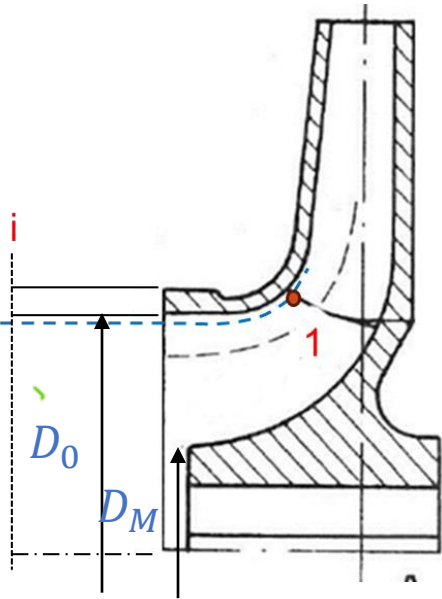
➤ Posto ancora in prima approssimazione $D_1 \approx D_0$, si ottiene:

$$NPSH_i = (1 + \lambda_m + \lambda_w) \frac{k_m^2}{2g} \left(\frac{4 Q_v}{\eta_v \pi \xi_0 D_0^2} \right)^2 + \frac{\lambda_w}{2g} \omega^2 \frac{D_0^2}{4}$$

➤ Si può pertanto determinare il valore del diametro D_0 che **minimizza** il valore dell' $NPSH_i$, imponendo $\partial(NPSH_i)/\partial D_0 = 0$:

$$D_{0_{NPSH_i}} = 2 \left(\frac{2 Q_v^2 k_m^2}{\eta_v^2 \pi^2 \omega^2 \xi_0^2} \frac{1 + \lambda_m + \lambda_w}{\lambda_w} \right)^{1/6}$$

Scelta del diametro D_0



$$D_{0NPSH_i} = 2 \left(\frac{2 Q_v^2 k_m^2}{\eta_v^2 \pi^2 \omega^2 \xi_0^2} \frac{1 + \lambda_m + \lambda_w}{\lambda_w} \right)^{1/6}$$

- L'ostruzione del mozzo ξ_0^2 in corrispondenza della bocca di aspirazione della girante potrebbe anche essere nulla; dipende dalla geometria della girante

- Posto:

$$\lambda_m \approx 0,04 \quad \lambda_w \approx 0,23 \quad k_m \approx 1,2$$

e considerando:

$$\eta_v \approx 0,94$$

$$D_M/D_0 \approx 0,25 \quad (\text{Questi valori dipendono dal progetto specifico})$$

si ottiene:

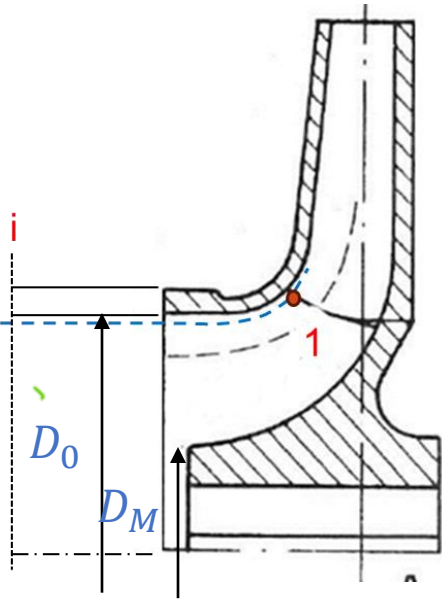
$$D_{0NPSH_i} \approx 4,79 \left(\frac{Q_v}{n} \right)^{1/3} \rightarrow NPSH_i \approx 1,107 \cdot 10^{-3} Q_v^{2/3} n^{4/3}$$

[Q_v : m^3/s , n : giri/min, D : mm, $NPSH$: m]

- Questa relazione è esemplificativa in quanto alcuni valori inseriti variano con le caratteristiche della macchina



Scelta del diametro D_0



$$D_{oNPSH_i} = 2 \left(\frac{2 Q_v^2 k_m^2}{\eta_v^2 \pi^2 \omega^2 \xi_0^2} \left[\frac{1 + \lambda_m + \lambda_w}{\lambda_w} \right] \right)^{1/6}$$

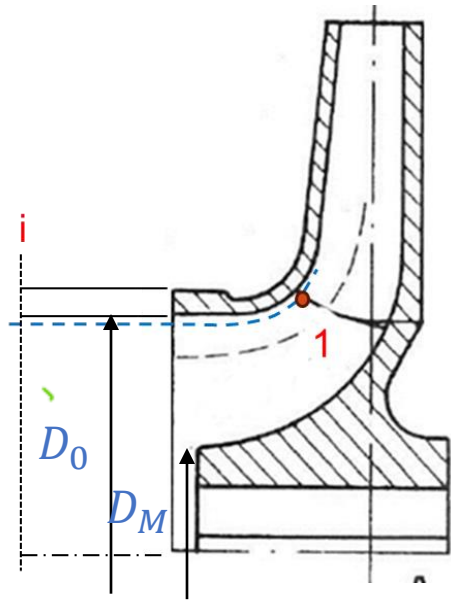
- Il diametro della bocca di aspirazione D_0 potrebbe essere **ottimizzato** a favore del rendimento η imponendo, ad esempio, la condizione di velocità relativa W_1 minima all'ingresso della girante

$$\frac{\partial(W_1^2)}{\partial D_0} = 0 \Rightarrow D_{0\eta} = 2 \left(\frac{2 Q_v^2 k_m^2}{\eta_v^2 \pi^2 \omega^2 \xi_0^2} \right)^{1/6}$$

$$\Rightarrow D_{0\eta} < D_{oNPSH_i}$$

- Solitamente si sceglie D_{oNPSH} in quanto il valore dell' $NPSH_i$ è principalmente condizionato da D_0 , mentre il rendimento dipende da molti altri fattori

Altri fattori di influenza

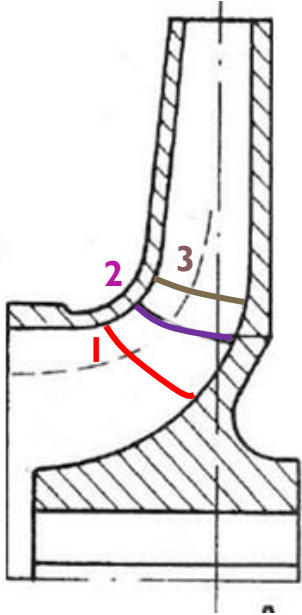


- Altri fattori che influenzano il valore dell' $NPSH_i$ sono:
 - la forma del **condotto meridiano** tra la bocca di aspirazione e il tratto radiale condotto meridiano,
 - il **posizionamento** e la **geometria** del bordo d'ingresso delle pale,
 - il **numero** di pale;
- Tutti questi parametri influenzano le velocità ed i coefficienti λ_m , λ_w e k_m :

$$NPSH_i = (1 + \lambda_m) \frac{C_{m1}^2}{2g} + \lambda_w \frac{W_1^2}{2g} = (1 + \lambda_m + \lambda_w) \frac{C_{m1}^2}{2g} + \lambda_w \frac{U_1^2}{2g}$$

Influenza della posizione del bordo di ingresso

$$NPSH_i = (1 + \lambda_m) \frac{C_{m1}^2}{2g} + \lambda_w \frac{W_1^2}{2g}$$



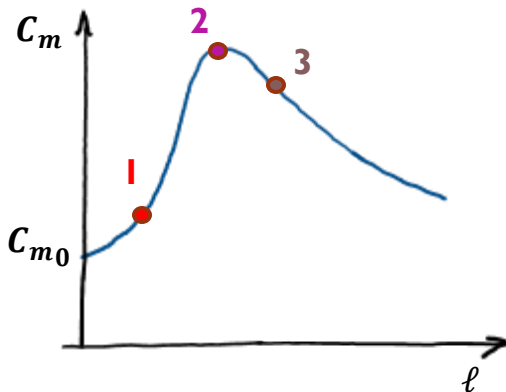
- Si confrontino i 3 diversi posizionamenti del bordo di ingresso della palettatura riportati in figura
- La posizione del bordo di ingresso lungo la linea di deflusso influenza sia il coefficiente di azione idrodinamica λ_w che la velocità C_{m1}

Coefficiente di azione idrodinamica λ_w

- La curvatura del condotto meridiano influenza il gradiente di pressione e velocità relativa sulla sezione 1
- Procedendo da 1 a 3, il contributo dell'accelerazione di Coriolis è via via sempre maggiore e comporta un aumento di λ_w

Velocità meridiana C_{m1}

- La velocità meridiana è influenzata dalla posizione del bordo d'ingresso secondo l'andamento qualitativo riportato nella figura accanto



Domande, Curiosità, Dubbi, Perplessità?

