



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE



Dipartimento di
Ingegneria
e Architettura



Corso di MACCHINE [065IN]
Corso di MACCHINE MARINE [100IN]

Prof. Rodolfo Taccani
Prof. Lucia Parussini
Prof. Marco Bogar

A.A. 2023-2024

Similitudine delle turbomacchine

Cifre adimensionali per macchine idrauliche:

$$\phi = \frac{Q}{\omega D^3}$$

$$k = \omega_s = \omega \frac{\sqrt{Q}}{(gH)^{3/4}} = 2\pi n_s$$

$$\Lambda = \frac{P_a}{\rho n^3 D^5}$$

$$\psi = \frac{gH}{\omega^2 D^2}$$

$$D_s = D \frac{(gH)^{1/4}}{\sqrt{Q}}$$

$$\eta = \frac{\rho g Q H}{P_a}$$

Ricordiamo che:

$Re = \rho \omega D^2 / \mu$ nella regione turbolenta a rugosità piena

$Ma = \omega D / a < 0.3$ flusso incompressibile

Numero caratteristico o velocità specifica di macchina

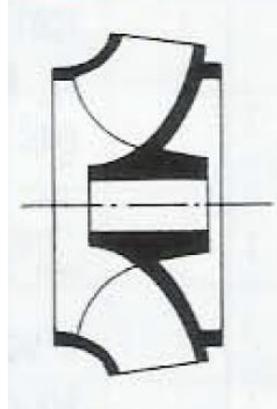
lenta (flusso radiale)



basse velocità di rotazione e/o
basse portate e/o lavoro massico
elevato

$$\omega_s = 0.2 \div 0.6$$

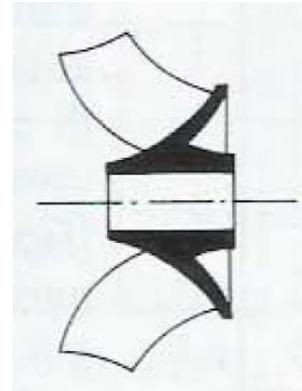
media (flusso radiale)



medie velocità di rotazione e/o
medie portate e/o lavoro massico
elevato

$$\omega_s = 0.6 \div 1.2$$

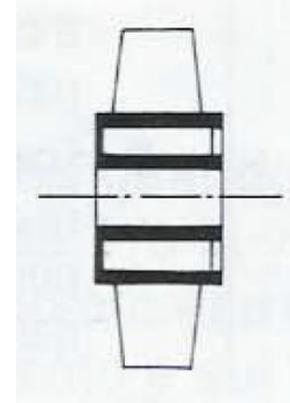
veloce (flusso misto)



alte velocità di rotazione e/o
portate elevate e/o piccolo
lavoro massico

$$\omega_s = 1.0 \div 3.0$$

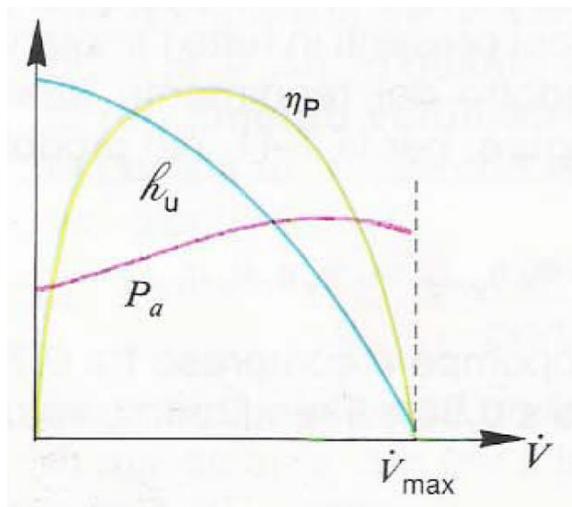
ultraveloce (flusso assiale)



altissime velocità di rotazione e/o
altissime portate e/o piccolo
lavoro massico

$$\omega_s = 2.0 \div 10$$

Curve caratteristiche



Curve caratteristiche di una pompa.

Esercitazione 1

Applicazione dei criteri di similitudine

Si vuole realizzare una pompa che presenti le seguenti caratteristiche (dati di progetto):

$$Q = 6 \text{ m}^3/\text{s} \quad H = 160 \text{ m} \quad n = 450 \text{ rpm} \quad \eta_e = 0.89$$

Il fluido operativo è acqua: $\rho = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$

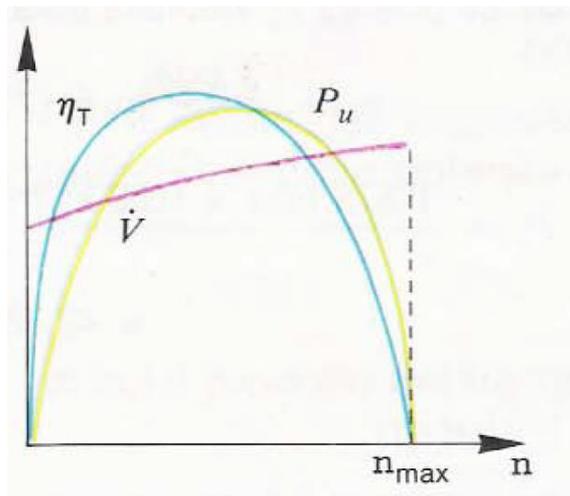
Si intende testarne un modello in similitudine geometrica nell'impianto di prova caratterizzato da:

$$Q_m = 0.15 \text{ m}^3/\text{s} \quad P_{a,m} = 180 \text{ kW}$$

Si suppone che il rendimento del modello sia uguale a quello della pompa, pertanto: $\eta_{e,m} = \eta_e = 0.89$

1. Trovare il tipo di pompa da utilizzare per soddisfare le caratteristiche richieste.
2. Trovare la potenza assorbita dalla pompa (P_a).
3. Trovare le condizioni alle quali deve operare il modello, intermini di velocità di rotazione (n_m) e di prevalenza (H_m), affinché sia in condizioni di similitudine con la pompa da progettare.
4. Esprimere il rapporto tra il diametro della pompa e quello del modello (D/D_m).

Curve caratteristiche



Curve caratteristiche di una turbina.

Esercitazione 2

Applicazione dei criteri di similitudine

Una turbina Kaplan ha i seguenti dati:

Potenza = 8.0 MW

salto utile = 10 m

velocità = 70 giri/min

efficienza = 85%

1. Determinare la portata attraverso la turbina e la sua velocità specifica.
2. Se si deve costruire un modello di dimensioni pari a $1/12$ per un salto di 3 m, determinare la velocità, la portata e la potenza del modello. Si può ipotizzare lo stesso rendimento per il modello e per il prototipo.

Esercitazione 3

Applicazione dei criteri di similitudine

Calcolare le velocità specifiche delle seguenti turbomacchine:

| <i>Sl</i> <i>No.</i> | <i>Type of</i> <i>turbomachine</i> | <i>Speed</i> <i>(rps)</i> | <i>Power</i> <i>(kW)</i> | <i>Flow rate</i> <i>(m³/s)</i> | <i>Change of enthalpy</i> <i>or head</i> | | <i>Density</i> <i>(kg/m³)</i> |
|-------------------------|---------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|--|---|--------------|---|
| | | | | | <i>Δh (kJ)</i> | <i>H (m)</i> | |
| 1 | Axial Flow Gas Turbine | 60 | 500 | – | 30 | – | 2 |
| 2 | IFR Gas Turbine | 300 | 750 | – | 250 | – | 1 |
| 3 | Axial Compressor | 120 | – | 25 | 40 | – | – |
| 4 | Centrifugal Compressor | 120 | – | 5 | 35 | – | – |
| 5 | Axial Fan | 22 | – | 3.5 | – | 55 mm W.G. | 1.25 |
| 6 | Radial Fan | 20 | – | 1.4 | – | 52 mm W.G. | 1.25 |

Esercitazione 4

Verifica della cavitazione di una pompa

Si considera l'impianto di pompaggio raffigurato. Il fluido operativo è acqua. Il tratto orizzontale presenta una lunghezza $l = 4 \text{ m}$, l'altezza della pompa rispetto al pelo libero risulta $h_1 = 2.5 \text{ m}$ e l'altezza del tratto di tubazione immersa risulta $h_2 = 1.5 \text{ m}$.

Il diametro costante della tubazione di aspirazione risulta $D_a = 0.12 \text{ m}$.

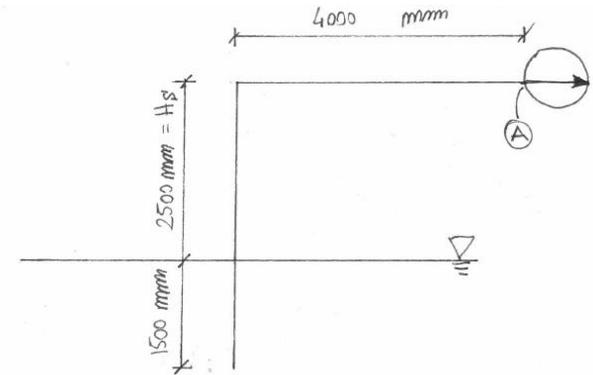
La pompa opera con una portata $Q = 0.05 \text{ m}^3/\text{s}$.

La pressione al pelo libero coincide con quella atmosferica p_{atm} .

Nella flangia di aspirazione (punto A) si rilevano, in condizioni di incipiente cavitazione, una pressione $p_A = 45000 \text{ Pa}$ e una temperatura dell'acqua $T_A = 20^\circ\text{C}$.

Le caratteristiche del fluido operativo, alla temperatura rilevata dal costruttore nella condizione di incipiente cavitazione durante la prova, sono:
 $p_v = 2339 \text{ Pa}$ (tensione di vapore) $\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3$ $\mu = 0.001 \text{ Pa s}$

Valutare se si manifesta la cavitazione.



Esercitazione 4

DIME/TEC

PROPRIETA' TERMODINAMICHE DELL'ACQUA (liquido e vapore) ALLA SATURAZIONE

TAB. 2A

| T °C | p bar | volume specifico | | m ³ /kg v _v | Entalpia | | | Entropia | | kJ/kg K s _v | t °C |
|---------|-----------|------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|----------------|--------|----------------|----------------|--------|---------------------------|---------|
| | | v _l | (v _v -v _l) | | h _l | r | h _v | s _l | r/T | | |
| 0 | 0.006 017 | 0.001 000 2 | 206.298 | 206.299 | -0.0 | 2501.6 | 2501.6 | -0.0 | 9.1578 | 9.1578 | 0 |
| 0.01 | 0.006 112 | 0.001 000 2 | 206.162 | 206.163 | +0.0 | 2501.6 | 2501.6 | 0 | 9.1575 | 9.1575 | 0.01 |
| 2 | 0.007 055 | 0.001 000 1 | 179.922 | 179.923 | 8.4 | 2496.8 | 2505.2 | 0.0306 | 9.0741 | 9.1047 | 2 |
| 4 | 0.008 129 | 0.001 000 0 | 157.271 | 157.272 | 16.8 | 2492.1 | 2508.9 | 0.0611 | 8.9915 | 9.0526 | 4 |
| 6 | 0.009 345 | 0.001 000 0 | 137.779 | 137.780 | 25.2 | 2487.4 | 2512.6 | 0.0913 | 8.9102 | 9.0015 | 6 |
| 8 | 0.010 720 | 0.001 000 1 | 120.965 | 120.966 | 33.6 | 2482.6 | 2516.2 | 0.1213 | 8.8300 | 8.9513 | 8 |
| 10 | 0.012 270 | 0.001 000 3 | 106.429 | 106.430 | 42.0 | 2477.9 | 2519.9 | 0.1510 | 8.7510 | 8.9020 | 10 |
| 12 | 0.014 014 | 0.001 000 4 | 93.834 | 93.835 | 50.4 | 2473.2 | 2523.6 | 0.1805 | 8.6731 | 8.8536 | 12 |
| 14 | 0.015 973 | 0.001 000 7 | 82.899 | 82.900 | 58.8 | 2468.5 | 2527.2 | 0.2098 | 8.5963 | 8.8060 | 14 |
| 15 | 0.017 139 | 0.001 000 8 | 77.977 | 77.978 | 62.9 | 2466.1 | 2529.1 | 0.2243 | 8.5582 | 8.7826 | 15 |
| 16 | 0.018 168 | 0.001 001 0 | 73.383 | 73.384 | 67.1 | 2463.8 | 2530.9 | 0.2388 | 8.5205 | 8.7593 | 16 |
| 18 | 0.020 624 | 0.001 001 3 | 65.086 | 65.087 | 75.5 | 2459.0 | 2534.5 | 0.2677 | 8.4458 | 8.7135 | 18 |
| 20 | 0.023 366 | 0.001 001 7 | 57.837 | 57.838 | 83.9 | 2454.3 | 2538.2 | 0.2963 | 8.3721 | 8.6684 | 20 |
| 25 | 0.031 660 | 0.001 002 9 | 43.401 | 43.402 | 104.8 | 2442.5 | 2547.3 | 0.3670 | 8.1922 | 8.5592 | 25 |
| 30 | 0.042 415 | 0.001 004 3 | 32.928 | 32.929 | 125.7 | 2430.7 | 2556.4 | 0.4365 | 8.0181 | 8.4546 | 30 |
| 35 | 0.056 216 | 0.001 006 0 | 25.244 | 25.245 | 146.6 | 2418.8 | 2565.4 | 0.5049 | 7.8495 | 8.3543 | 35 |
| 40 | 0.073 750 | 0.001 007 8 | 19.545 | 19.546 | 167.5 | 2406.9 | 2574.4 | 0.5721 | 7.6861 | 8.2583 | 40 |
| 45 | 0.095 820 | 0.001 009 9 | 15.275 | 15.276 | 188.4 | 2394.9 | 2583.3 | 0.6383 | 7.5277 | 8.1661 | 45 |

Esercitazione 4

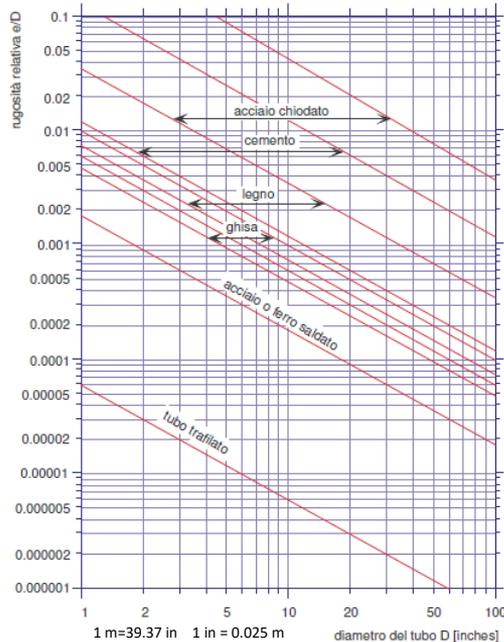
| | | |
|----------|--|---------|
| DIME/TEC | PROPRIETÀ TERMOFISICHE DELL'ACQUA ALLA SATURAZIONE | TAB. 11 |
|----------|--|---------|

| | | |
|---|--------------------------------|-----------------------|
| T Temperatura | a Diffusività termica | <i>PEDICI:</i> |
| c Calore specifico a p=cost | Pr Numero di Prandtl | l liquido saturo |
| β Coefficiente volumetrico di dilatazione termica | σ Tensione superficiale | v vapore saturo secco |
| k Conducibilità termica | | |
| μ Viscosità dinamica | | |
| ν Viscosità cinematica | | |

| T °C | c_{pl} kJ/kgK | c_{pv} | β_l 10^{-3} 1/K | β_v | k_l 10^{-3} W/mK | k_v | μ_l 10^{-6} kg/m s | μ_v | ν_l 10^{-6} m ² /s | ν_v | a_l 10^{-6} m ² /s | a_v | Pr_l | Pr_v | σ 10^{-3} N/m |
|---------|--------------------|----------|----------------------------|-----------|-------------------------|-------|-----------------------------|---------|--|---------|--------------------------------------|-------|--------|--------|------------------------------|
| 0.01 | 4.229 | 1.868 | -0.08044 | 3.672 | 561.0 | 17.07 | 1792 | 9.216 | 1.792 | 1898 | 0.1327 | 1883 | 13.51 | 1.008 | 75.65 |
| 10.00 | 4.188 | 1.874 | 0.08720 | 3.548 | 580.0 | 17.62 | 1306 | 9.461 | 1.307 | 1006 | 0.1385 | 999.8 | 9.434 | 1.006 | 74.22 |
| 20.00 | 4.183 | 1.882 | 0.2089 | 3.435 | 598.4 | 18.23 | 1002 | 9.727 | 1.004 | 562.0 | 0.1433 | 559.6 | 7.005 | 1.004 | 72.74 |
| 30.00 | 4.183 | 1.892 | 0.3050 | 3.332 | 615.4 | 18.89 | 797.7 | 10.01 | 0.8012 | 329.3 | 0.1478 | 328.3 | 5.422 | 1.003 | 71.20 |
| 40.00 | 4.182 | 1.904 | 0.3859 | 3.240 | 630.5 | 19.60 | 653.2 | 10.31 | 0.6584 | 201.3 | 0.1519 | 200.9 | 4.333 | 1.002 | 69.60 |
| 50.00 | 4.182 | 1.919 | 0.4572 | 3.156 | 643.5 | 20.36 | 547.1 | 10.62 | 0.5537 | 127.8 | 0.1558 | 127.7 | 3.555 | 1.001 | 67.95 |
| 60.00 | 4.183 | 1.937 | 0.5222 | 3.083 | 654.3 | 21.18 | 466.6 | 10.93 | 0.4746 | 83.91 | 0.1591 | 83.92 | 2.983 | 1.000 | 66.24 |
| 70.00 | 4.187 | 1.958 | 0.5827 | 3.018 | 666.3 | 22.07 | 404.1 | 11.26 | 0.4132 | 56.80 | 0.1620 | 56.85 | 2.551 | 0.9992 | 64.49 |
| 80.00 | 4.194 | 1.983 | 0.6403 | 2.964 | 670.0 | 23.01 | 354.5 | 11.59 | 0.3648 | 39.51 | 0.1644 | 39.56 | 2.219 | 0.9989 | 62.68 |

Esercitazione 4

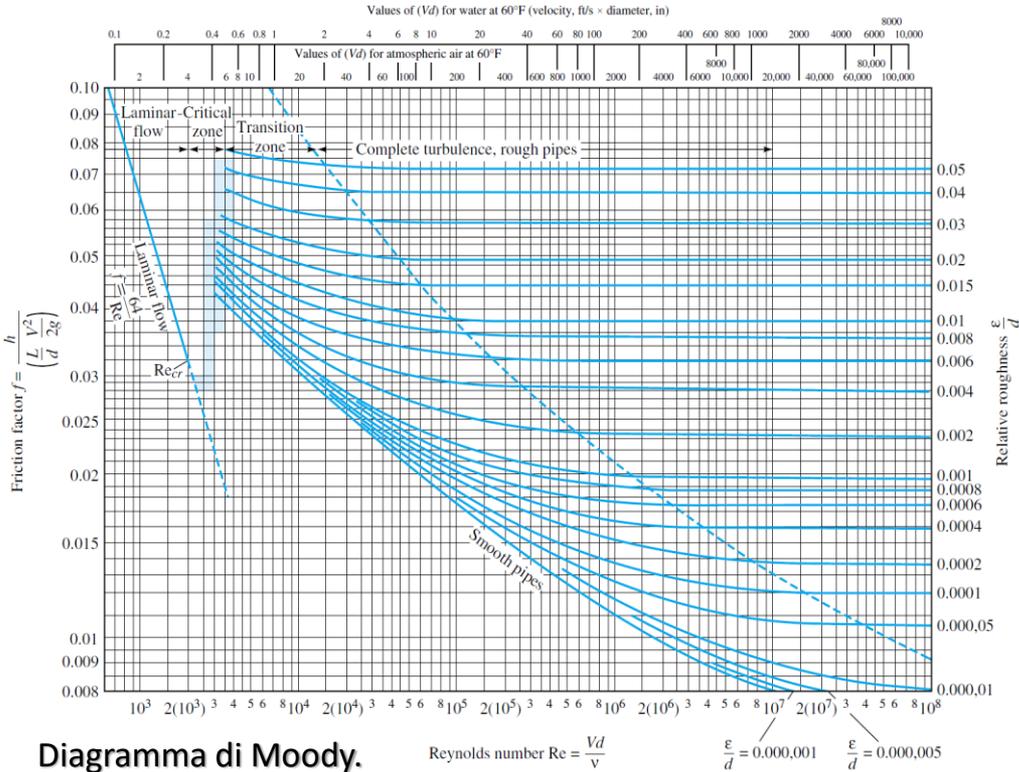
$D_a = 0.12 \text{ m} = 4.7 \text{ in}$
Tubo in ghisa $e/D=0.002$



I materiali utilizzati per la produzione di tubazioni per l'acqua sono molti, vediamo i più utilizzati:

- **ghisa**: questo materiale viene utilizzato per le acque di scarico. Queste tubazioni hanno una "dilatazione termica" piuttosto bassa, ma necessitano di un rivestimento sia interno che esterno che gli consenta di poter resistere ai prodotti chimici presenti nelle acque di scarico;
- **acciaio inox**: materiale molto affidabile per ciò che riguarda le sollecitazioni meccaniche, affidabile anche sotto l'aspetto sanitario. Bisogna però prestare **attenzione alla sua corrosione e "dilatazione termica"** soprattutto per quegli impianti dove l'acciaio viene completamente ricoperto dal calcestruzzo;
- **rame**: si tratta di un materiale che può essere utilizzato sia per l'acqua di carico che di scarico. È un materiale affidabile e idoneo al contatto con l'acqua potabile, la "dilatazione termica" è simile a quella dell'acciaio. Per poter resistere alla corrosione esterna **deve essere rivestito con PVC**.
- **piombo**: è vietato l'utilizzo di questo materiale per il trasporto di acqua potabile, ma ancora molto **utilizzato per gli scarichi**;
- **plastica**: i vari materiali plastici che vengono utilizzati per la produzione di tubazioni hanno una "dilatazione termica" molto bassa, una buona resistenza alle fiamme, sono adatti al contatto con l'acqua ad uso sanitario e resistono molto bene alla corrosione. Presentano un piccolo difetto che è quello di **diventare piuttosto ruvidi all'interno**, creando così depositi che possono compromettere il corretto funzionamento della tubazione.

Esercitazione 4



Perdite continue

FORMULE SEMIEMPIRICHE

$$h_c = f \frac{L V^2}{D 2g}$$

$$f = \frac{64}{Re}$$

Flussi laminari

$$\frac{1}{f^{1/2}} = -2.0 \log \left(\frac{\epsilon/d}{3.7} + \frac{2.51}{Re f^{1/2}} \right)$$

Formula di Colebrook per flussi turbolenti

$$\frac{1}{f^{1/2}} \approx -1.8 \log \left(\left(\frac{\epsilon/d}{3.7} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re} \right)$$

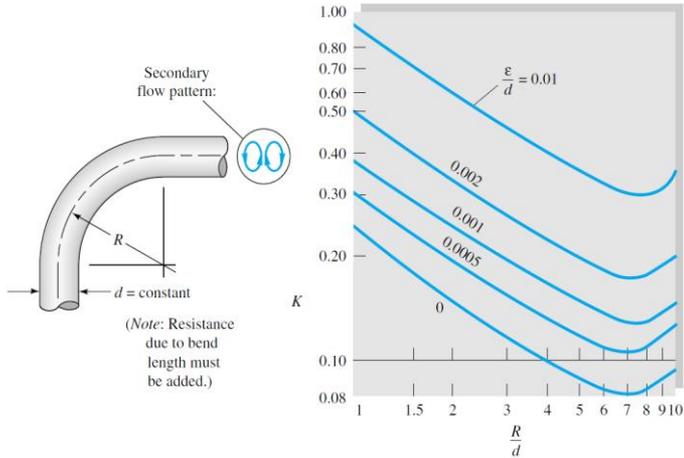
Formula di Haaland (esplicita) per flussi turbolenti

$$\frac{1}{f^{1/2}} = -2.0 \log \frac{\epsilon/d}{3.7}$$

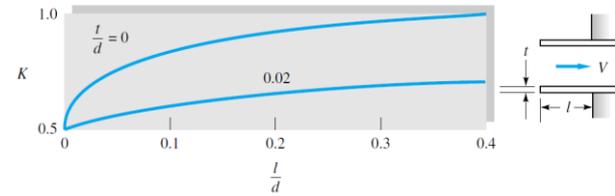
Formula per regione di rugosità piena

Esercitazione 4

Perdite accidentali



Coefficiente di resistenza per curve di 90°.



Coefficienti di perdita per ingresso rientrante.

$$h_a = K \frac{V^2}{2g}$$

Perdite totali

$$\frac{\Delta p_0}{\rho g} = h_c + h_a$$

Esercitazione 5

Dimensionamento di una pompa centrifuga

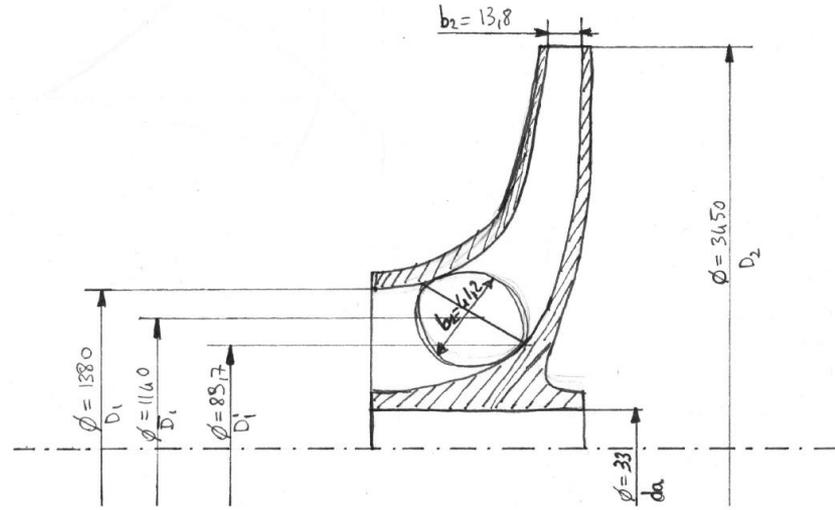
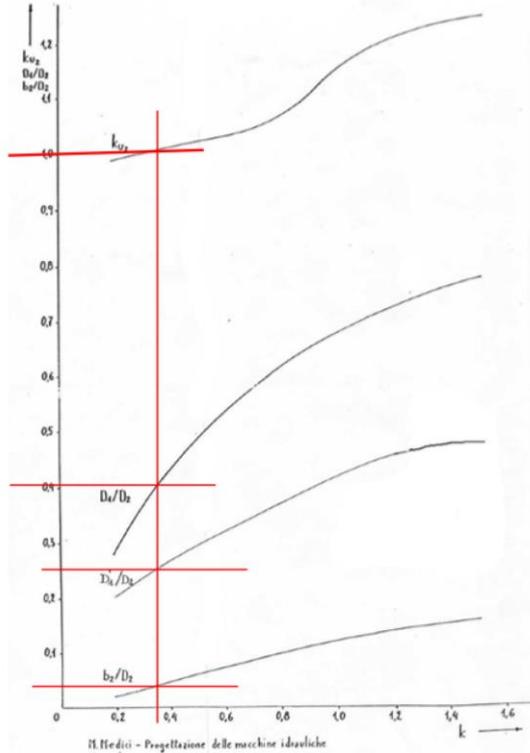
Si vuole eseguire un dimensionamento di massima di una pompa centrifuga. I dati di progetto sono i seguenti:

$$\begin{aligned}H &= 35 \text{ m} \\Q &= 120 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \\n &= 1450 \text{ rpm}\end{aligned}$$

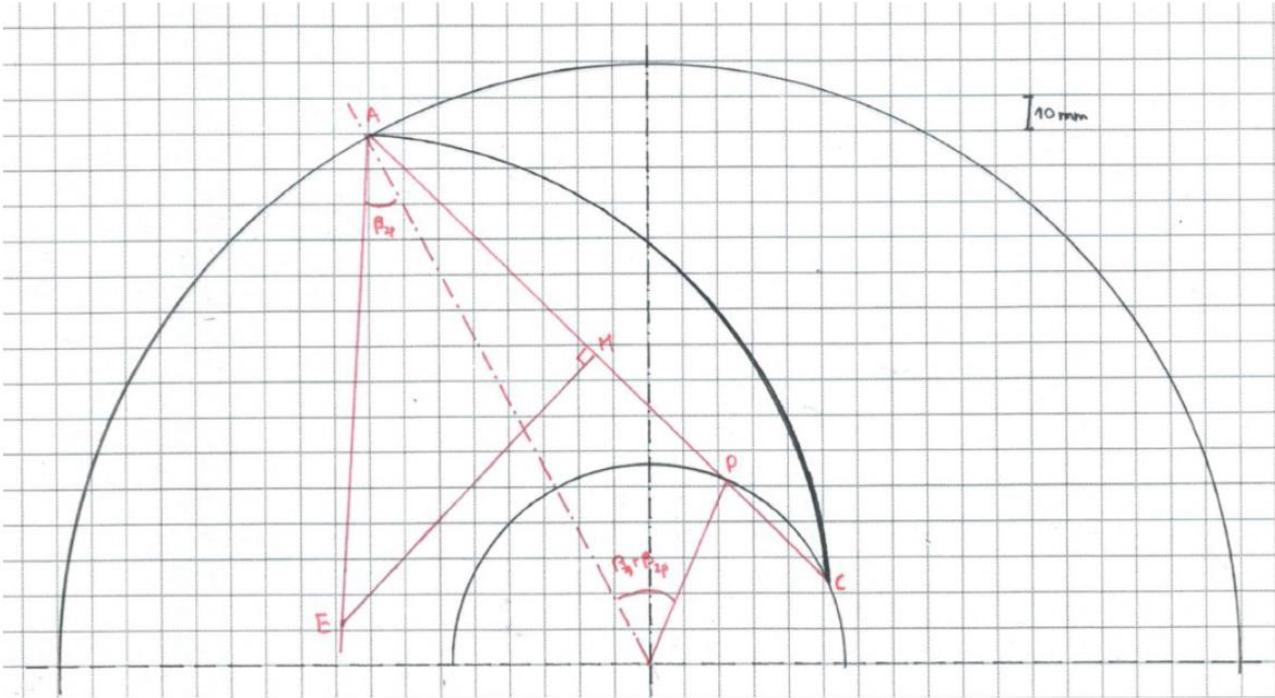
Il fluido operativo è acqua.

- 1) Trovare le dimensioni principali della sezione meridiana della macchina.
- 2) Trovare la potenza del motore elettrico che deve essere utilizzato.
- 3) Trovare i triangoli di velocità.
- 4) Tracciare in modo indicativo la forma delle pale.

Esercitazione 5



Esercizione 5





UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE



Dipartimento di
**Ingegneria
e Architettura**