



[Esta Foto](#) de Autor Desconhecido está licenciado em [CC BY-SA](#)

# Aula 2 – Hidrostática

# Subdivisões da Mecânica dos Fluidos e da Hidráulica

## ► - Hidráulica

a) Hidrostática: esforços a que estão submetidos os fluidos em repouso

b) Hidrodinâmica: fluidos em movimento.

c) Hidráulica aplicada: solução de problemas práticos.

- Dimensionamento de tubulações e canais
- Dimensionamento de redes de abastecimento
- Projetos de sistemas de irrigação e drenagem

# Massa específica ( $\rho$ )

$$\rho = \frac{\text{massa}}{\text{volume}}$$

Sistema MK\*S:

$$\rho = \text{UTM m}^{-3}$$

SI (MKS):

$$\rho = \text{kg m}^{-3}$$

CGS:

$$\rho = \text{g cm}^{-3}$$

Quanto < Temperatura > massa específica

$$\rho \text{ água a } 20^{\circ}\text{C} = 101,75 \text{ UTM m}^{-3} = 998,17 \text{ kg m}^{-3}$$

$$\rho \text{ água a } 4^{\circ}\text{C} = 101,94 \text{ UTM m}^{-3} = 1000 \text{ kg m}^{-3}$$

# Peso específica ( $\gamma$ )

$$\gamma = \frac{\text{peso}}{\text{volume}}$$

Sistema MK\*S:

$$\gamma = \text{N m}^{-3}$$

SI (MKS):

$$\gamma = \text{kgf m}^{-3}$$

CGS:

$$\gamma = \text{dina cm}^{-3}$$

$$\gamma \text{ \u00e1gua a } 4^{\circ} \text{ C} = 9810 \text{ N m}^{-3} = 1000 \text{ kgf m}^{-3}$$

$$\gamma = \frac{\text{peso}}{\text{volume}} = \frac{\text{m} \cdot g}{\text{volume}} = \rho \cdot g \quad \text{e} \quad \rho = \frac{\gamma}{g}$$

$\rho$

# Densidade relativa (d)

$$d = \frac{\rho \text{ substância considerada}}{\rho \text{ substância padrão}}$$

Ou

$$d = \frac{\gamma \text{ substância considerada}}{\gamma \text{ substância padrão}}$$

**Medida relativa → Adimensional**

Para nós a substância padrão será a água a 4°C:

$$\gamma = 9810 \text{ N m}^{-3} = 1000 \text{ kgf m}^{-3}$$

## Tópicos da aula 2:

- Pressão e empuxo
- Empuxo em superfícies sólidas
- Pressão
  - Pressão relativa e pressão absoluta
  - Unidades de medida
  - Medidores
  - Cálculo em condutos interligados

# 1 Pressão e Empuxo

Pressão: força normal por unidade de área que a massa fluída exerce sobre uma superfície imersa.

$$P = \frac{F}{A} = \frac{\text{Força}}{\text{Área}}$$

Empuxo: força total resultante da ação da pressão sobre uma área imersa

$$E = F \times A$$

# Exemplo

▶ empuxo atuante sobre uma comporta circular

▶ Dados: Pressão:  $P = 1000 \text{ kgf m}^{-2}$ ;

Diâmetro:  $D = 0,3 \text{ m} \rightarrow$  Área:  $A = \frac{\pi D^2}{4} = 0,0707 \text{ m}^2$

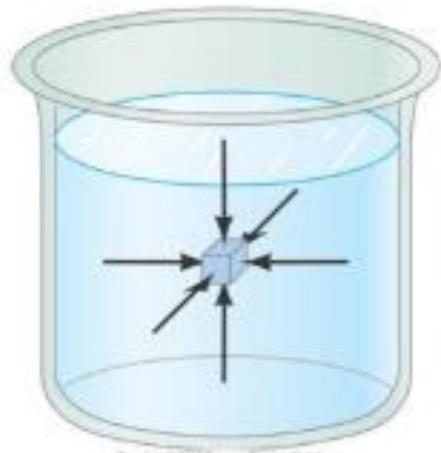
Empuxo:  $E = P \times A \rightarrow E = 1000 \times 0,707 = 70,7 \text{ kgf}$

SI:  $E = 70,7 \text{ kgf} \times 9,81 \text{ N/kgf} = 693,6 \text{ N}$

## 2. Princípios Básicos da Hidrostática: Leis fundamentais

### ► 2.1 Lei de Pascal

A pressão em ponto no interior de um líquido qualquer em equilíbrio é igual em todas as direções



**As forças de pressão exercidas por um fluido em equilíbrio sobre as superfícies com as quais contacta exercem-se perpendicularmente a essas superfícies.**

# 2. Princípios Básicos da Hidrostática:

## Leis fundamentais

### ▶ 2.2 Lei de Stevin

A diferença de pressão entre dois pontos da massa de um líquido em equilíbrio é igual a diferença de profundidade multiplicada pelo peso específico do líquido

Forças atuantes: empuxo ( $E_1$  e  $E_2$ ) e peso do líquido ( $F_P$ )

$$\text{Peso do líquido: } F_P = \gamma V_L$$

$F_P$  – peso (força), kgf

$\gamma$  - peso específico,  $\text{kgf m}^{-3}$  ( $\gamma_{\text{água}} = 1000 \text{ kgf m}^{-3}$  ou  $9810 \text{ N m}^{-3}$ )

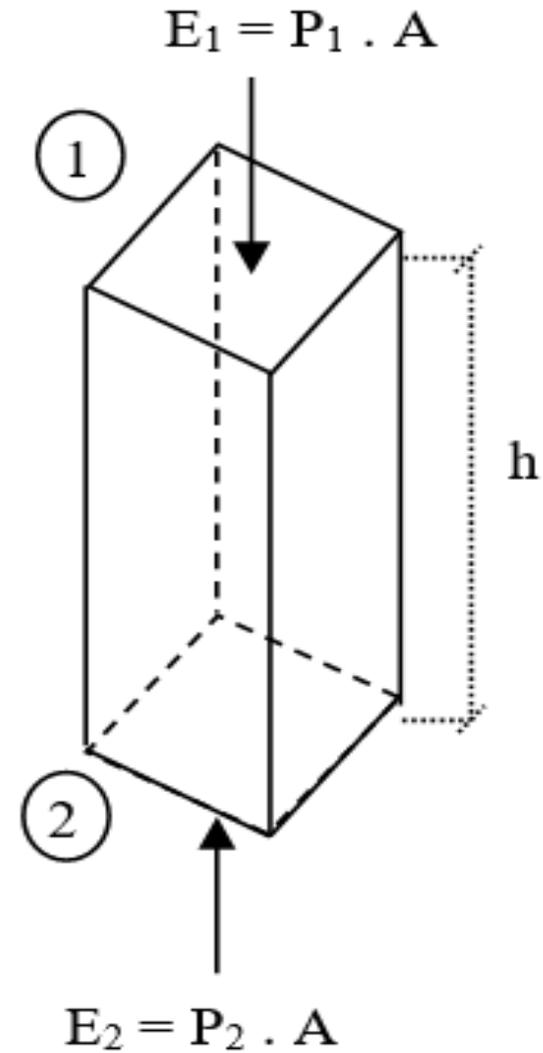
$V_L$  – volume,  $\text{m}^3$

$$V_L = h \cdot A$$

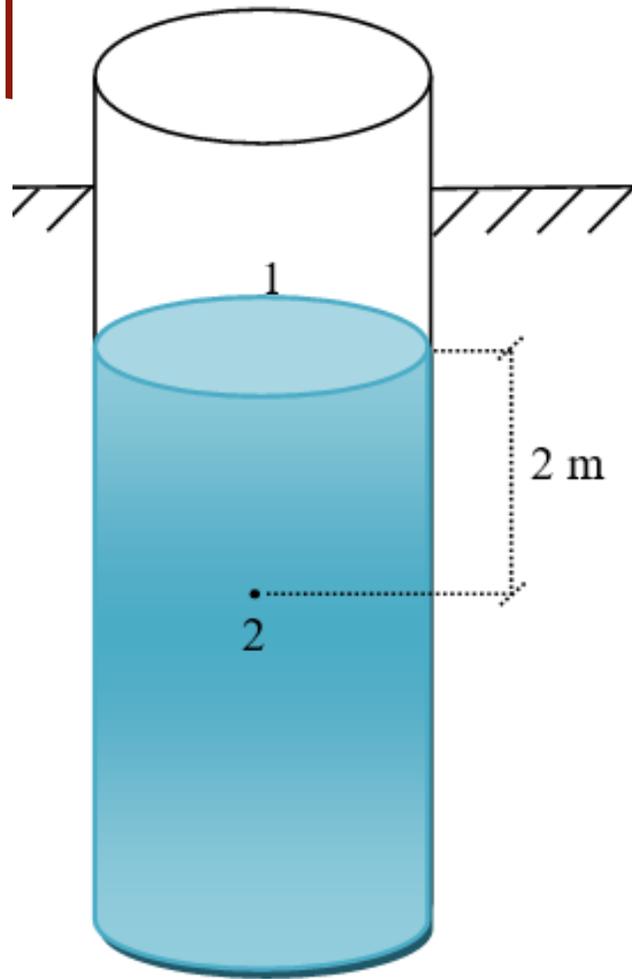
Líquido em repouso:  $\sum F = 0$

$$P_1 \cdot A + \gamma \cdot h \cdot A - P_2 \cdot A = 0$$

$$P_1 - P_2 = \gamma \cdot h$$



Pressão atuante em um ponto a 2 metros de profundidade em um poço de água.



Dados:

$$\gamma = 1000 \text{ kgf m}^{-3} \text{ ou } 9810 \text{ N m}^{-3}$$

$$h = 2 \text{ m}$$

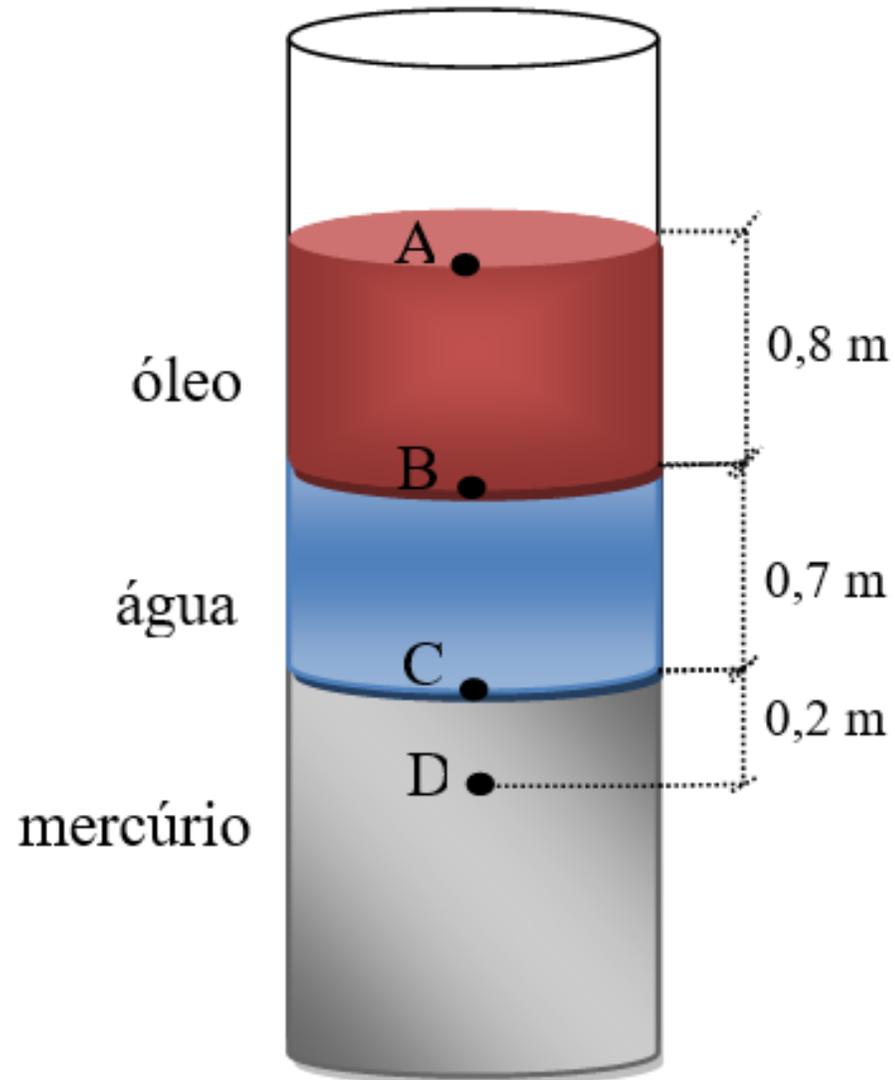
Cálculo:

$$P_2 - P_1 = \gamma \cdot h$$

$$P_1 = 0 \quad \Rightarrow \quad P_2 = 1000 \times 2 = 2000 \text{ kgf m}^{-2}$$

$$(16620 \text{ N m}^{-2})$$

Calcular a pressão relativa nos pontos A, B, C e D do esquema a seguir:



Dados:

$$\gamma_{\text{óleo}} = 850 \text{ kgf m}^{-3}$$

$$\gamma_{\text{água}} = 1000 \text{ kgf m}^{-3}$$

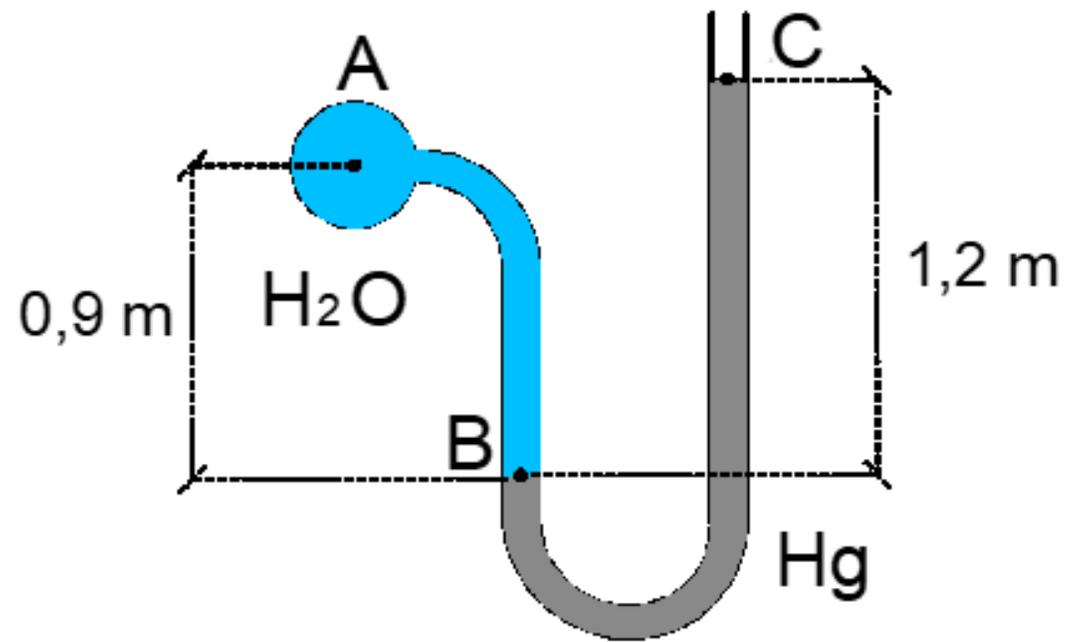
$$\gamma_{\text{mercúrio}} = 13600 \text{ kgf m}^{-3}$$

$$h_1 = 0,8 \text{ m}$$

$$h_2 = 0,7 \text{ m}$$

$$h_3 = 0,2 \text{ m}$$

Calcular a pressão relativa no ponto A, no esquema a seguir:



Dados:

$$\gamma_{\text{água}} = 1000\text{ kgf m}^{-3}$$

$$\gamma_{\text{mercúrio}} = 13600\text{ kgf m}^{-3}$$

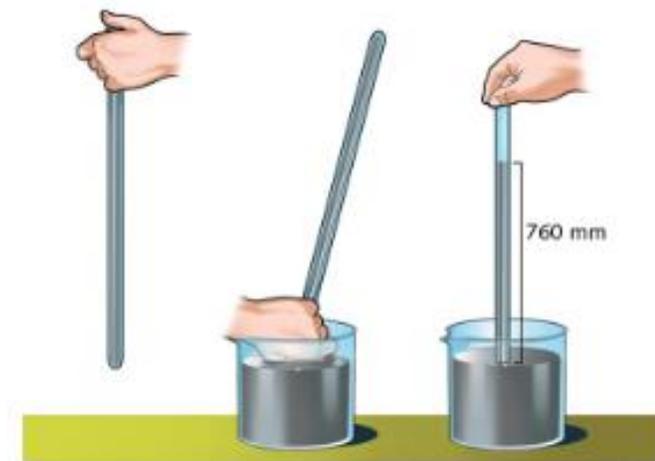
$$h_1 = 1,2\text{ m}$$

$$h_2 = 0,9\text{ m}$$

Princípio dos vasos comunicantes: a pressão é igual em dois pontos de um mesmo líquido, situados no mesmo nível (posição vertical).

# 3 Pressão absoluta e pressão relativa

- ▶ 3.1 Experiência de Torricelli (século XVII)
- ▶ Torricelli utilizou um tubo graduado de 1m de comprimento fechado em uma das extremidades. Encheu o tubo completamente com mercúrio e mergulhou a extremidade aberta em um recipiente contendo também mercúrio.
- ▶ Torricelli foi conclusivo em determinar que a pressão atmosférica realizava esta ação. E como a marca apresentada era de 76 cm, definiu que a pressão atmosférica teria o valor de 760 mm de Hg.

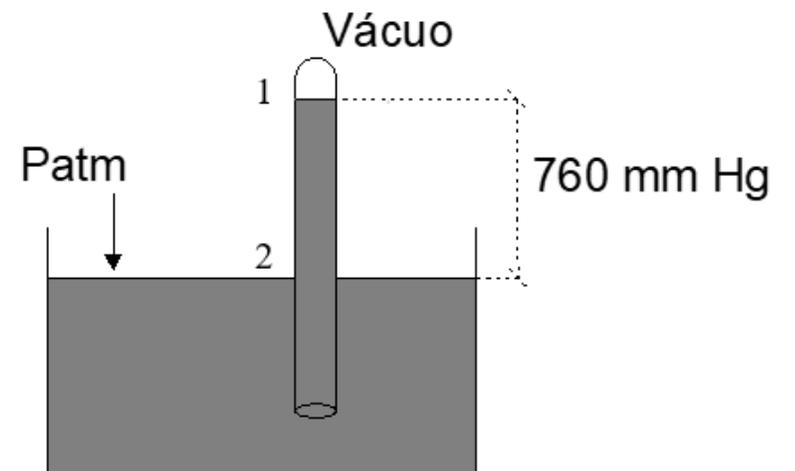


<https://profes.com.br/Rafaela.a.f/blog/experimento-de-torricelli>

# 3 Pressão absoluta e pressão relativa

- ▶ Torricelli realizou esse experimento por mais vezes, variando o local.
- ▶ Altitude influenciava na altura da coluna de mercúrio
- ▶ Conclusão: a pressão atmosférica diminui com a altitude.

Medida prática: 
$$P_{\text{atm loc}} = P_{\text{atm (NM)}} - \frac{0,12 \text{ mca}}{100} \text{ Alt}_{\text{loc}}$$



# 3 Pressão absoluta e pressão relativa

- ▶ Pressão relativa: medida em relação à  $P_{atm}$

$$P_{rel} = 0 \Rightarrow \text{desconsidera } P_{atm} \text{ local}$$

Pressão manométrica

- ▶ Pressão absoluta:  $P_{abs} = P_{rel} + P_{atm} \text{ local}$

$$P_{abs} = 0 \Rightarrow P = 0 \text{ (zero absoluto ou vácuo)}$$

$$P_{atm} \text{ local} \rightarrow \text{ao nível do mar} = 10.330 \text{ kgf/m}^2 = 10,33 \text{ m.c.a} = 760 \text{ mm Hg}$$

# Exemplos:

- ▶ Calcular a pressão atmosférica em Piracicaba → Altitude local: 600 m
- ▶ Calcular a pressão relativa e absoluta a 3 metros de profundidade de um lago situado a 1200 m de altitude.

# 4 Unidades de medida de pressão

a) Sistema Internacional:  $\text{N m}^{-2}$  (Pascal)  $\rightarrow$  múltiplos: kPa e MPa

b)  $\text{kgf m}^{-2} \rightarrow$  Sistema MK\*S (técnico) múltiplos:  $\text{kgf cm}^{-2}$

c)  $\text{dina cm}^{-2}$  (baria)  $\rightarrow$  Múltiplo:  $1 \text{ bar} = 10^6 \text{ baria} \approx 10000 \text{ kgf m}^{-2}$  ou  $1 \text{ kgf cm}^{-2}$

d) mca  $\rightarrow 1 \text{ mca} = 1000 \text{ kgf m}^{-2}$

# 4 Unidades de medida de pressão

e) PSI (pounds per squared inch)

PSI: libra-força por polegada quadrada

$$1 \text{ PSI} = 702,85 \text{ kgf m}^{-2} = 7,0285 \text{ mca} \text{ ou } 0,70285 \text{ atm}$$

f) Atmosfera física  $\rightarrow 1 \text{ Atm} = 10,33 \text{ mca}$

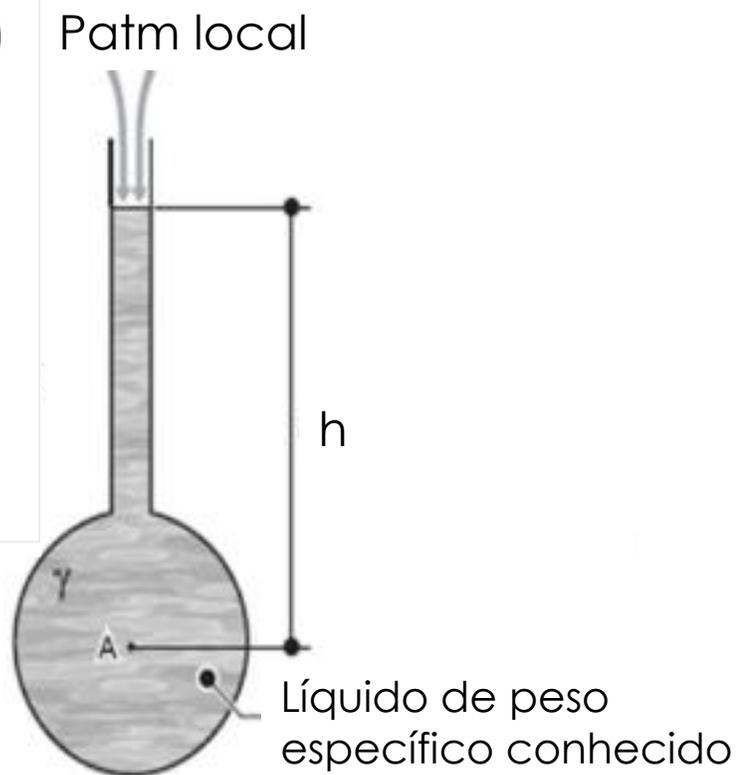
g) Atmosfera técnica  $\rightarrow 1 \text{ Atm}^* = 10 \text{ mca} \text{ ou } 1 \text{ kgf cm}^{-2}$

h) milímetros de mercúrio  $\rightarrow 760 \text{ mm Hg} = 1 \text{ atm física (759,56 mm)}$   
 $10,33 \text{ mca} = 10330 \text{ kgf m}^{-2}$

# 5 Medidores de Pressão

a) Piezômetros (medição de pressão relativa)

- Não mede pressões negativas
- É impraticável para pressões elevadas (a altura da coluna seria muito alta)
- Não mede pressão de gases (o gás escapa, não formando coluna)

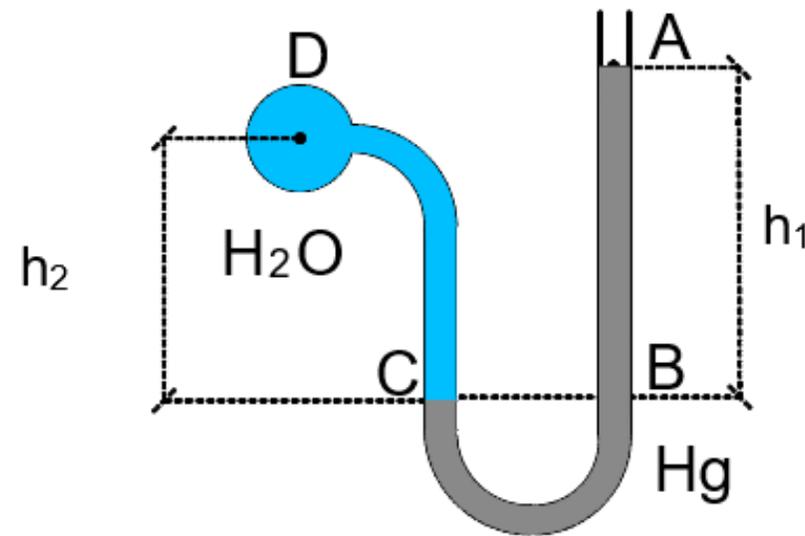


# 5 Medidores de Pressão

## b) Tubo “U” (manômetro)

Indicado para pressões mais altas  
(líquido indicador de peso específico alto)

Exemplo:  $h_1 = 1\text{m}$ ;  $h_2 = 0,7\text{m}$ . Calcule a pressão no ponto D.

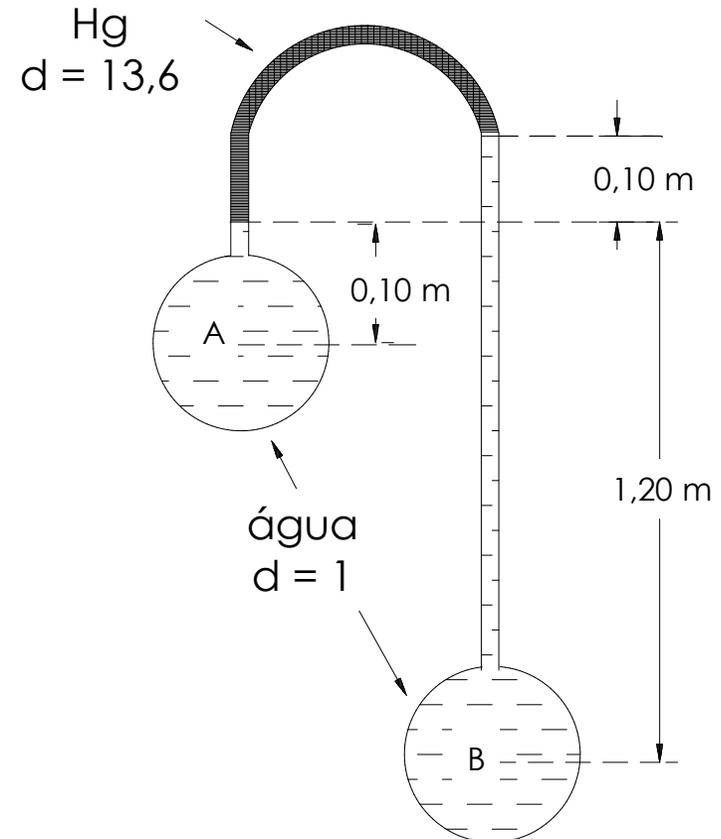


# 5 Medidores de Pressão

## c) Manômetros diferenciais

Determina a diferença de pressão entre 2 pontos

Exemplo: Calcule a diferença de pressão entre os pontos A e B.



# 5 Medidores de Pressão

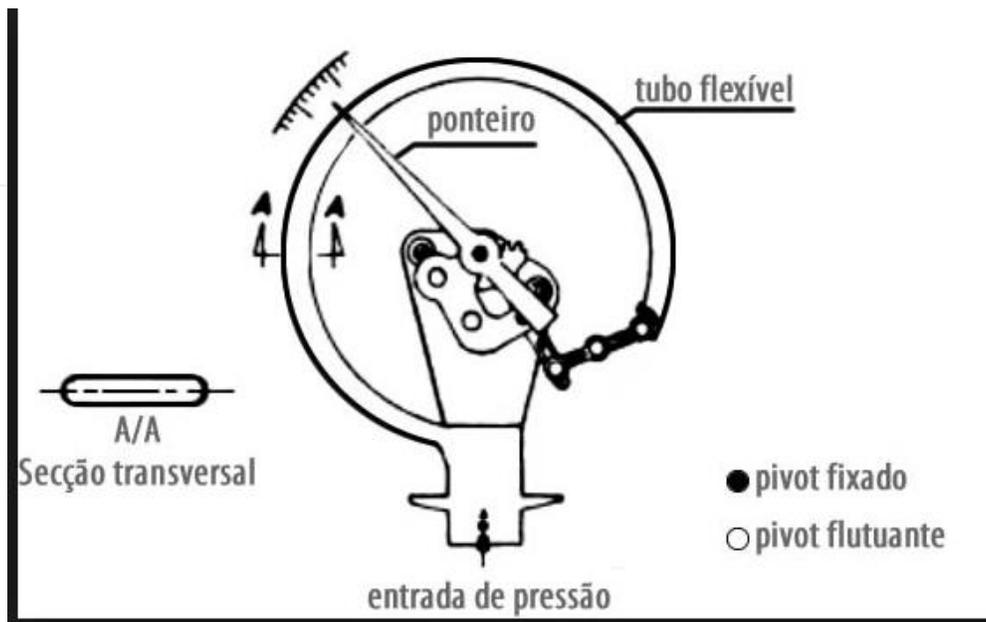
## d) Manômetro tipo Bourdon

- Este tipo de sensor é um dos mais utilizados atualmente na indústria, tendo uma faixa de trabalho de 0,5 a 2500 Kg/cm<sup>2</sup>.
- É constituído de um tubo em forma de "C" que terá o seu deslocamento proporcional à pressão aplicada.



# 5 Medidores de Pressão

## d) Manômetro tipo Bourdon



# 5 Medidores de Pressão

e) Manômetro de peso morto

calibração de manômetros tipo Bourdon



# 5 Medidores de Pressão

e) Manômetro eletrônico ou digital



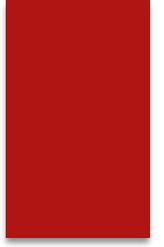
<http://www.directindustry.com/pt/prod/ashcroft/product-7297-661757.html>



<http://www.directindustry.com/pt/prod/druck-temperatur-leitenberger-gmbh/product-14053-416401.html>

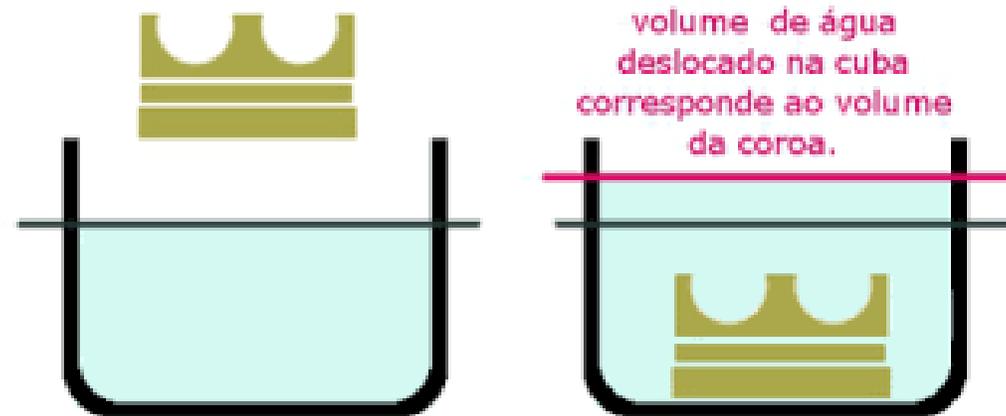


Para entregar:



# 6 Empuxo

**Princípio de Arquimedes:** “*Todo corpo imerso total ou parcialmente num fluido em equilíbrio, dentro de um campo gravitacional, fica sob a ação de uma força vertical, com sentido ascendente, aplicada pelo fluido. Esta força é denominada empuxo (E), cuja intensidade é igual ao peso do líquido deslocado pelo corpo*”.



<https://ipemsp.wordpress.com/2011/12/05/arquimedes/>



<https://www.infoescola.com/fisica/empuxo/>

# O que é o empuxo?

- É uma **força** de sustentação dirigida para cima quando se mergulha algum objeto dentro de um líquido ou mesmo de um gás.



# 6 Empuxo

$$\rightarrow P \propto (\rho, g, h)$$

- P é maior na parte inferior do corpo (maior profundidade)
- P gera uma força resultante chamada Empuxo (Princípio de Arquimedes).
- Empuxo é a força resultante da pressão de um fluido sobre uma área de contato com um corpo imerso nele.

$$E = P \cdot A \quad \rightarrow \quad P = \gamma \cdot h \quad \Rightarrow \quad E = \gamma \cdot h \cdot A$$

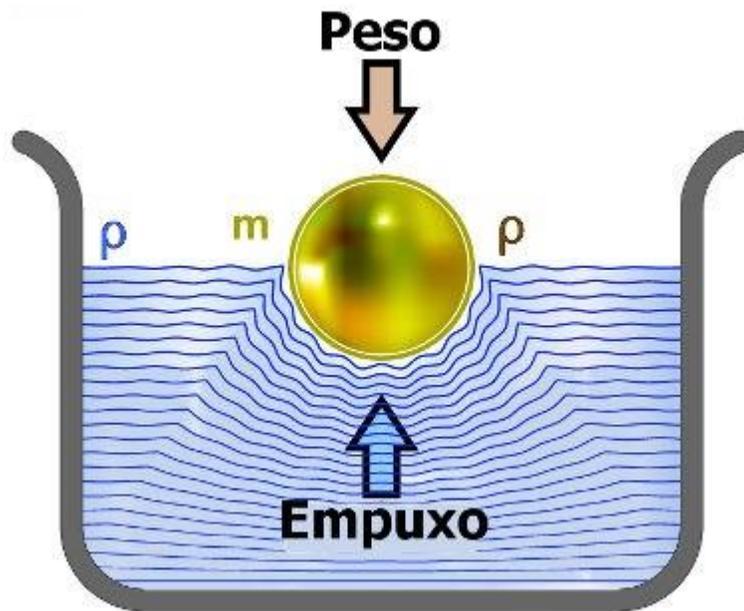
$\gamma$  - peso específico do fluido

$h$  – altura da coluna de fluido

$A$  – área de contato entre o corpo imerso e o fluido

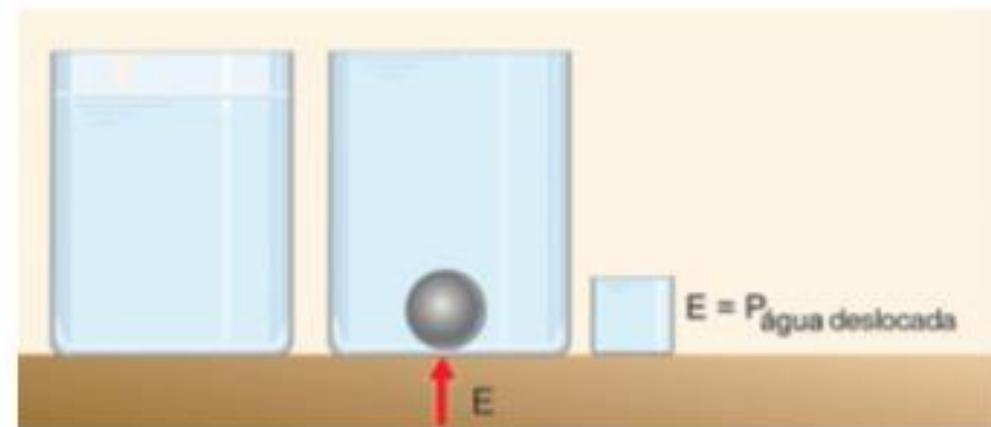
# 6 Empuxo

Empuxo é igual ao peso do líquido deslocado



<https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/empuxo.htm>

Ex.: esfera metálica em líquido



# 6 Empuxo

$$E = \text{Peso do corpo deslocado} = m \cdot g$$

Sendo:  $\rho = \frac{\text{massa}}{\text{volume}}$   $\rightarrow m = \rho \cdot \text{Volume}$  e  $\gamma = \rho \cdot g$

$$E = \rho \cdot \text{Vol.} \cdot g$$

$$E = \gamma \text{ líquido} \cdot \text{Volume do corpo}$$

# Aplicação: Flutuabilidade de um corpo na água

$$F < E (\gamma_c < \gamma_{H_2O}) \Rightarrow$$

Corpo flutua no líquido

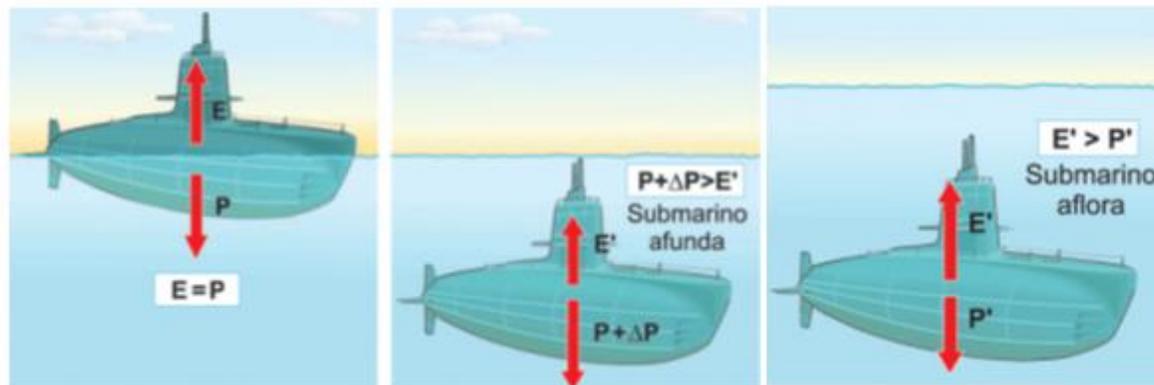
$$F = E (\gamma_c = \gamma_{H_2O}) \Rightarrow$$

Corpo em equilíbrio e totalmente imerso no líquido

$$F < E (\gamma_c > \gamma_{H_2O}) \Rightarrow$$

Corpo afunda no líquido

A. Submarino



# Aplicação: Flutuabilidade de um corpo na água

Exemplo: Um objeto com massa de 10 kg e volume de  $0,002 \text{ m}^3$  está totalmente imerso dentro de um reservatório de água ( $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1000 \text{ kgf m}^{-3}$ ), determine:

B.1- O valor do peso do objeto ( $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$ )

B.2 - A intensidade da força de empuxo que a água exerce sobre o objeto

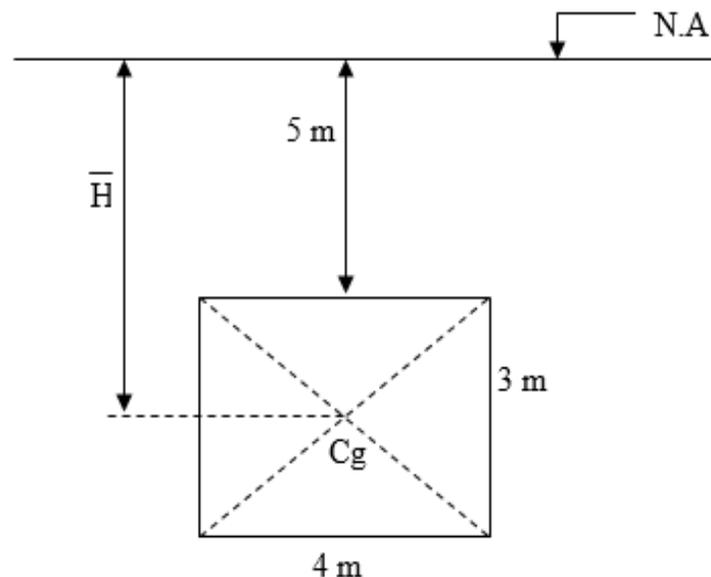
B.3 - O peso aparente do objeto quando imerso na água

# Empuxo sobre superfícies sólidas

## ► A) Superfícies planas imersas em líquido

- Perpendicular à superfície. Igual ao produto da área pela pressão no centro de gravidade (Cg):  $E = P \times A$

Exemplo: Empuxo exercido pela água em uma comporta vertical de 3 x 4 m, cujo topo está imerso em água e encontra-se a 5 m de profundidade.



$$\gamma_{H_2O} = 1000 \text{ kgf m}^{-3}$$

$$P = \gamma_{H_2O} \cdot h$$

$$E = P \cdot A = \gamma_{H_2O} \cdot \bar{H} \cdot A$$

$$\bar{H} = 5 + \frac{3}{2} = 6,5 \text{ m}$$

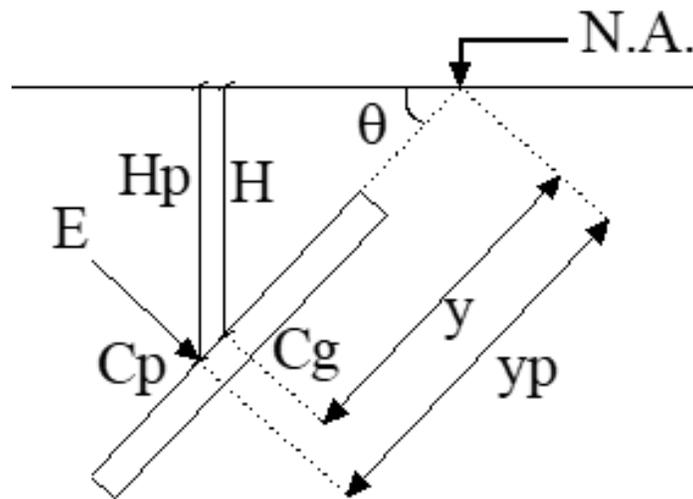
$$E = 1000 \cdot 6,5 \cdot (3 \times 4)$$

$$E = 78000 \text{ kgf}$$

# Empuxo sobre superfícies sólidas

## ► B) Superfícies inclinadas imersas em líquido

Ponto de aplicação do empuxo: Centro de pressão ( $C_p$ ): situa-se um pouco abaixo do centro de gravidade ( $C_g$ )



$\theta$  = ângulo de inclinação

$$H_p = Y_p \text{ sen } \theta$$

$$H_p = \bar{Y} \text{ sen } \theta$$

$$Y_p = \bar{Y} + \frac{I_o}{A \bar{Y}_{cg}}$$

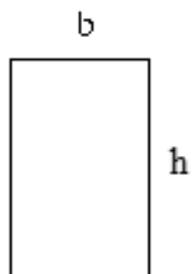
A – área de atuação do empuxo

$I_o$  – momento de inércia da área de atuação da pressão

**Figura**

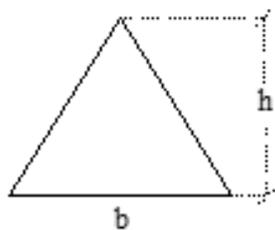
**A**

**I<sub>o</sub>**



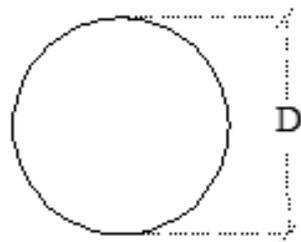
$$b \cdot h$$

$$\frac{b h^3}{12}$$



$$\frac{b h}{2}$$

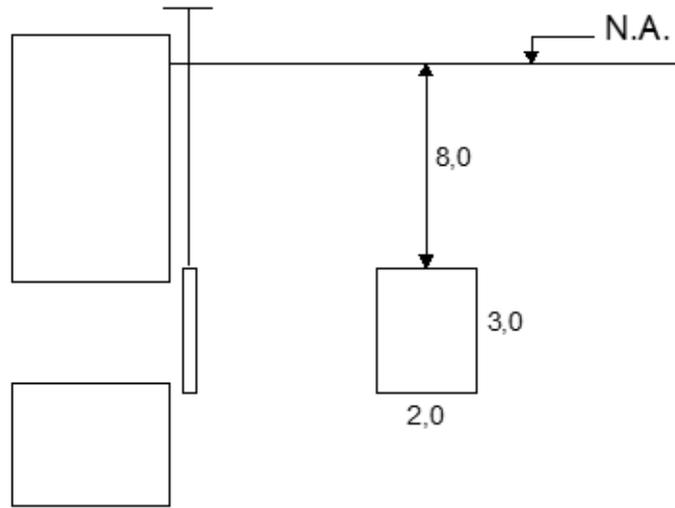
$$\frac{b h^3}{36}$$



$$\frac{\pi D^2}{4}$$

$$\frac{\pi D^4}{64}$$

a) Determinar o empuxo e o centro de pressão da comporta esquematizada abaixo:



Empuxo:

$$E = \gamma \cdot \bar{H} \cdot A$$

$$E = 1000 \text{ kgf m}^{-3} \cdot (8 + 1,5)\text{m} \cdot (2 \cdot 3)$$

$$E = 57000 \text{ kgf}$$

Retângulo: momento de inércia ( $I_o$ ), área ( $A$ ) e profundidade do centro de gravidade ( $\bar{Y}$ )

$$I_o = \frac{b h^3}{12}$$

$$A = 2 \times 3 = 6 \text{ m}^2$$

$$I_o = \frac{2 \times 3^3}{12} = 4,5 \text{ m}^4$$

$$\bar{Y} = 8 + \frac{3}{2} = 9,5 \text{ m}$$

Centro de pressão:

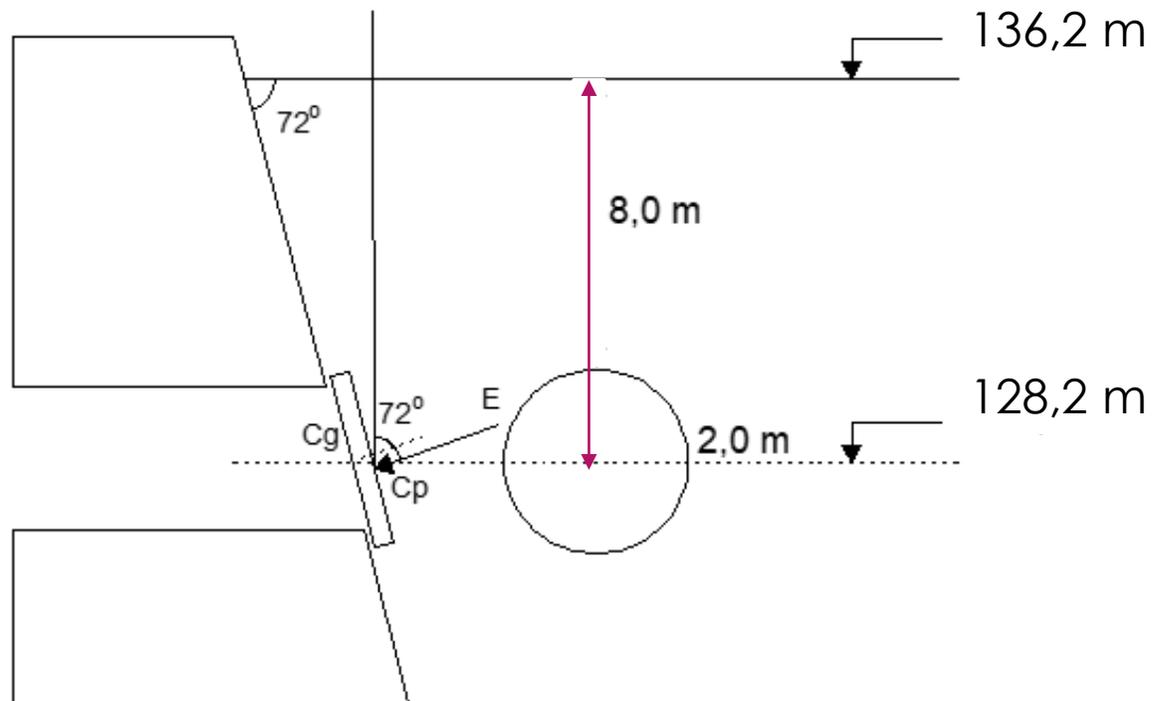
$$Y_p = \bar{Y} + \frac{I_o}{A \cdot \bar{Y}}$$

$$Y_p = 9,5 + \frac{4,5}{6 \cdot 9,5}$$

$$Y_p = 9,579 \text{ m}$$

b) A abertura do sangradouro de uma barragem é um orifício circular com inclinação de  $72^\circ$  em relação à horizontal. Esse orifício está fechado por uma comporta (chapa de ferro) plana com diâmetro de 2 metros. Se o nível de água se mantém na cota 136,2 m e o centro do orifício está na cota 128,2 m, calcule:

- a força que se deve aplicar em uma haste vertical para suspender a chapa;
- a distância do centro da chapa em que deverá estar a conexão da haste com a tampa, para que a chapa seja suspensa por igual.



- 1) Dada a comporta esquematizada na figura abaixo, determinar:
- o empuxo
  - o centro de pressão

