

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA “LUIZ DE QUEIROZ”
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE BIOSISTEMAS

LEB 5024 – HIDRÁULICA APLICADA

1 - Objetivos

Ao final do curso o aluno terá adquirido conhecimentos necessários para:

- a) Utilizar equipamentos de determinação de pressões atuantes nos líquidos;
- b) Quantificar forças atuantes em corpos submersos (comportas, taludes de barragens, etc.);
- c) Utilizar os conceitos de conservação de massas e energia no escoamento dos líquidos;
- d) Quantificar perdas de energia (perdas de carga) em tubulações e acessórios hidráulicos;
- e) Dimensionar adutoras em escoamentos por gravidade e sob bombeamento;
- f) Dimensionar sistemas de bombeamento;
- g) Medir a vazão em condutos livres e forçados, utilizando vários processos.

2 – Programa resumido (Ver quadro de cronograma)

- a. Propriedades físicas dos fluidos e sistema de unidades
- b. Hidrostática (Estática dos fluidos); estudo das pressões nos fluidos; estudo das forças atuantes sobre superfícies imersas;
- c. Hidrodinâmica (Dinâmica dos fluidos); teorema de Bernoulli e suas aplicações nos escoamentos dos fluidos;
- d. Condutos forçados (tubulações); propriedades e perdas de carga; adutoras por gravidade; sistemas de saída única e de múltiplas saídas; dimensionamentos.
- e. Bombas hidráulicas; tipos, classificação e princípio de funcionamento; curvas características; NPSH; variação de condições de operação; dimensionamentos.
- f. Sistemas de recalque; alturas geométricas e manométricas; perdas de carga; golpe de aríete e segurança de sistemas; acessórios; operação; dimensionamento.
- g. Hidrometria; estudo dos principais métodos e instrumentos utilizados para medidas de velocidade e de vazão em cursos de água (córregos, rios, canais etc.).
- h. Condutos livres (canais); propriedades e dimensionamento.

3 – Temas para trabalhos (Vídeo-aulas)

- a) Seleção de diâmetro de tubulações baseado em análise econômica
- b) Efeito da adição de polímeros em escoamentos líquidos
- c) Golpe de aríete em sistemas de recalque: estimativa e meios de controle
- d) Bombas alternativas
- e) Redes malhadas
- f) Transporte de resíduos em suspensão
- g) Aplicações da Hidráulica na vida cotidiana

4 – Literatura recomendada

AZEVEDO NETO, J.M. et al. **Manual de Hidráulica**. 8ª ed., São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 1998. 669 p.

CETESB. **Bombas e sistemas de recalque**. São Paulo: CETESB, 1974.

LENCASTRE, M. **Manual de Hidráulica Geral**. São Paulo: Ed. Blücher/USP, 1972.

MACINTYRE, A.J. **Bombas e instalações de bombeamento**. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara, 1987.

PERES, J. G. **Hidráulica Agrícola**. Piracicaba: JGP, 2006. 373 p.

PORTO, Rodrigo de Melo. **Hidráulica básica**, 2ª ed, São Carlos, SP: Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 2000. 519 p.

VENNARD, J.K. & STREET, R.L. **Elementos de Mecânica dos Fluidos**. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara - Dois, 1978.

BERNARDO, S. Manual de Irrigação. 6ª ed., Viçosa: Imprensa Universitária da UFV, 1995. 627 p.

DUARTE, S. N.; BOTREL, T. A.; FURLAN, R. A. Hidráulica: Exercícios. Série didática 009. Departamento de Engenharia Rural – ESALQ, 1996.

Sites: <http://www.leb.esalq.usp.br/disciplinas/Fernando/leb1440/>

<http://www.leb.esalq.usp.br/disciplinas/Tarlei/leb472/>

[HIDRABOOK](#)

AULA 1 – Introdução, Propriedades Físicas dos Fluidos e Sistemas de Unidades

1. Introdução

1.1. Definição: Hidráulica é a ciência que trata das leis do equilíbrio e movimento dos líquidos e da aplicação dessas leis à solução de problemas práticos.

- Principal foco de estudo: fluxos de líquidos limitados por paredes resistentes (Tubos e canais naturais ou artificiais).

1.2. Generalidades

Hidráulica = ramo da Mecânica dos fluidos

Mecânica dos fluidos desenvolveu-se em dois ramos:

a) Ramo puramente teórico, de análises matemáticas exatas baseadas nas leis da mecânica.

Limitação: nem sempre resolve problemas práticos.

b) Ramo prático, com ampla aplicação de experimentos e acumulação de dados para utilização prática na engenharia.

Limitação: não explica as causas dos fenômenos, sendo ciência puramente empírica.

Hidráulica contemporânea: associação de ambos os ramos.

- Fenômenos examinados e modelados matematicamente, utilizando-se as leis da mecânica teórica;

- Resultados obtidos comparados com dados experimentais para verificar a concordância entre teoria pura e prática;

- Revisão das deduções e introdução de coeficientes de ajuste (adaptação).

Fenômenos complexos e de extrema dificuldade de análise puramente teórica

- Estudados de modo puramente experimental

- Desenvolvimento de fórmulas empíricas para explicação do fenômeno
- Utilização das fórmulas empíricas na solução de problemas

Exemplos:

- Dimensionamento de tubulações para condução de água.
- Cálculo da perda de carga (pressão) em tubos e canais.
- Dimensionamento de vertedores (sangradouros) de barragens.

Avanço dos estudos teóricos reduz a distância entre os dois caminhos.

1.3. Subdivisões da Mecânica dos Fluidos e da Hidráulica

Mecânica dos fluidos

- a) Aerodinâmica
- b) Engenharia naval
- c) Hidráulica
 - i. Hidrostática: esforços a que estão submetidos os fluidos em repouso
 - ii. Hidrodinâmica: fluidos em movimento.
 - iii. Hidráulica aplicada: solução de problemas práticos.
 - Dimensionamento de tubulações e canais
 - Dimensionamento de redes de abastecimento
 - Projetos de sistemas de irrigação e drenagem

2. Sistema de unidades

2.1. Sistemas MLT e FLT

- Sistemas de definição de características físicas de grandezas

- Baseados nas unidades fundamentais de medidas

MASSA, FORÇA, COMPRIMENTO, TEMPO

- Massa: quantidade de matéria que um corpo contém.

- Peso: ação exercida no corpo pela gravidade.

MLT: Massa (F, *force*)
 Comprimento (L, *length*)
 Tempo (T, *time*)

FLT: Força (F, *force*)
 Comprimento (L, *length*)
 Tempo (T, *time*)

2.2. Análise dimensional de grandezas:

Grandeza	Unidade SI*	Análise dimensional	
		Sistema MLT	Sistema FLT
Comprimento (L)	m	L	L
Aceleração (a)	m s ⁻²	L T ⁻²	L T ⁻²
Massa (m)	kg	M	(m = F/a) F L ⁻¹ T ²
Força (F)	N**	(F = m x a) M L T ⁻²	F
Velocidade (V)	m s ⁻¹	L T ⁻¹	L T ⁻¹
Vazão (Q)	m ³ s ⁻¹	L ³ T ⁻¹	L ³ T ⁻¹
Pressão (P)	N m ⁻²	M L ⁻¹ T ⁻²	F L ⁻²

* SI = Sistema Internacional de Unidades

** N = newton, unidade de força (m x a); 1 N = 1 kg m s⁻²

2.3. Quadro de unidades

Grandeza	Sistema		
	MLT		FLT
	CGS	MKS (SI) ^{*1}	MK*S ^{*2}
Massa	g	kg	UTM ^{*3}
Força	dina ^{*4}	N ^{*5} (newton)	kgf ^{*6}
Comprimento	cm	m	M
Tempo	s	s	s
Pressão	dina cm ⁻²	N m ⁻²	kgf m ⁻²
Vazão	cm ³ s ⁻¹	m ³ s ⁻¹	m ³ s ⁻¹

¹ Sistema MKS ou Sistema Internacional de Unidades

² Sistema MK*S Técnico

^{*3} UTM = unidade técnica de massa

$$UTM = F/a = \text{kgf} / (\text{m/s}^2) \quad \Rightarrow \quad UTM = F/g = \text{kgf} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^2 \quad \Rightarrow \quad 1 \text{ UTM} = 9,81 \text{ kg}$$

^{*4} dina = g cm s⁻²

^{*5} Newton = kg m s⁻²

^{*6} 1 kgf = 1 kg x 9,81 m/s² ou 9,81 N

Exemplo: Qual a massa necessária para exercer uma força de 1 kgf num local cuja aceleração da gravidade é de 1,1 m/s²?

Dados: a = 1,1 m/s²

$$F = 1 \text{ kgf} = 9,81 \text{ N}$$

$$m = ?$$

No sistema MKS: $F = m \times a$

$$9,81 \text{ N} = m \times 1,1 \text{ m/s}^2$$

$$9,81 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = m \times 1,1 \text{ m/s}^2$$

$$m = 8,918 \text{ kg}$$

No sistema MK*S: $F = m \times a$

$$1 \text{ kgf} = m \times 1,1 \text{ m/s}^2$$

$$m = 1 \text{ kgf} / 1,1 \text{ m/s}^2$$

$$m = 0,909 \text{ UTM}$$

2.4. Exercícios - Transformar para o Sistema Internacional de Unidades (SI ou MKS):

a) 3 UTM (massa) 1 UTM = 9,81 kg \Rightarrow 3 UTM = 3 x 9,81 = 29,43

R.: 29,43 kg

b) 36 km h⁻¹ (velocidade)

$$R.: 36 \frac{\text{km}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \times \frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ km}} = 10 \text{ m s}^{-2}$$

c) 108 L h⁻¹ (vazão)

$$R.: 108 \frac{\text{L}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} = 0,00003 \text{ m s}^{-2}$$

d) 1000 kgf m⁻³ (peso específico)

$$R.: 1000 \frac{\text{kgf}}{\text{m}^3} \times \frac{9,81 \text{ N}}{1 \text{ kgf}} = 9810 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$$

e) 1 dina (força)

$$R.: 1 \text{ dina} = 1 \frac{\text{g cm}}{\text{s}^2} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} \times \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} = 0,00001 \text{ kg m s}^{-2} = 10^{-5} \text{ N}$$

3. Propriedades físicas dos fluidos

3.1. Definições

- a) Fluido: substância que se deforma continuamente quando submetido a uma tensão de cisalhamento.

Modalidade da matéria que compreende líquidos e gases.

- b) Líquido: fluido com volume definido (praticamente incompressível) e forma indefinida.

Líquidos tomam a forma do recipiente em que está.

- c) Gás: fluido com volume e forma indefinidos.

Gases variam consideravelmente o volume sob variações de pressão.

3.2. Massa específica (ρ)

Análise dimensional:

$$\rho = \frac{\text{massa}}{\text{volume}} = \frac{FL^{-1}T^2}{L^3} = F L^{-4} T^2$$

$$\text{Sistema MK*S: } \rho = \text{UTM m}^{-3} = \frac{\text{kgf m}^{-1} \text{s}^2}{\text{m}^3} = \text{kgf m}^{-4} \text{s}^2$$

$$\text{SI (MKS): } \rho = \text{kg m}^{-3}$$

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

3.3. Peso específico (γ)

$$\gamma = \frac{\text{peso}}{\text{volume}} = \frac{F}{L^3} = F L^{-3}$$

$$\text{MK*S: } \text{kgf m}^{-3}$$

$$\text{SI (MKS): } \text{N m}^{-3}$$

$$\text{CGS: } \text{dina cm}^{-3}$$

3.4. Densidade relativa (d)

- Medida relativa

- Relação entre a massa específica de uma substância qualquer e a massa específica da água a 4°C.

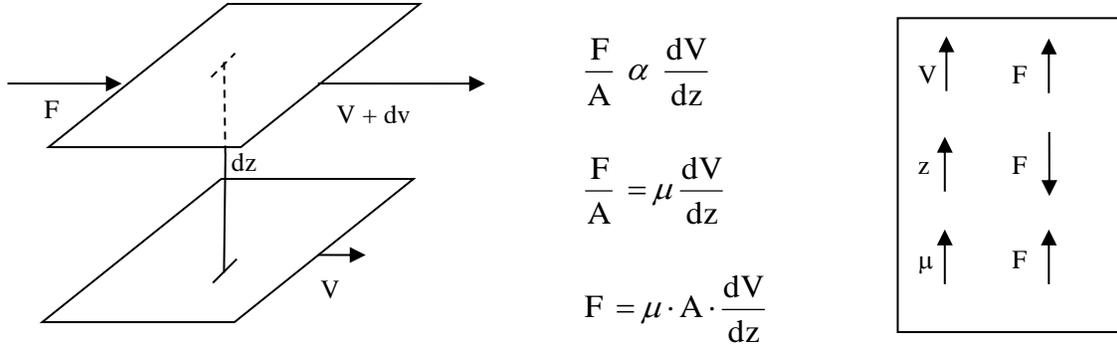
$$d = \frac{\rho_{\text{substância}}}{\rho_{\text{água}}}$$

$$\text{Ex.: } \text{Quartzo} \quad d = 2,75$$

$$\text{Água (4°C)} \quad d = 1$$

3.5. Viscosidade dinâmica (μ , atrito interno)

Propriedade dos fluidos responsável pela sua resistência à força cisalhante.



F – força de cisalhamento

A – área da superfície do fluido

V – velocidade de deslocamento do fluido

z – distância vertical entre duas lâminas de moléculas do fluido

μ - viscosidade dinâmica (coeficiente de atrito interno)

Análise dimensional da viscosidade dinâmica:

$$\mu = \frac{F}{A} \cdot \frac{dz}{dV} \Rightarrow \frac{F}{L^2} \cdot \frac{L}{L T^{-1}} \Rightarrow F \cdot L^{-2} \cdot T$$

No sistema MKS*: $F \cdot L^{-2} \cdot T = \text{kgf m}^{-2} \text{ s}$

No sistema MKS: $F \cdot L^{-2} \cdot T = \text{N m}^{-2} \text{ s}$

No sistema CGS: $F \cdot L^{-2} \cdot T = \text{dina cm}^{-2} \text{ s (POISE)}$

3.6. Viscosidade cinemática (ν)

- Forma simplificada de apresentar a viscosidade

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

ρ = massa específica (massa/volume)

Análise dimensional (sistema FLT):

- massa específica:

$$\rho = \frac{\text{massa}}{\text{volume}} = \frac{F L^{-1} T^2}{L^3} = F L^{-4} T^2$$

- viscosidade dinâmica:

$$\mu = \frac{F}{A} \cdot \frac{dz}{dV} = F L^{-2} T$$

- viscosidade cinemática:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{F L^{-2} T}{F L^{-4} T^2} = L^2 T^{-1}$$

- O coeficiente de viscosidade cinemática (ν) não tem unidade de força nem de massa

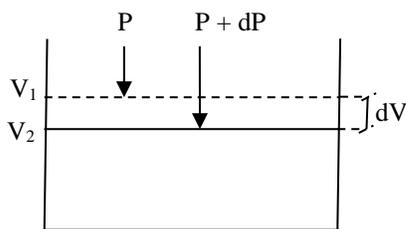
- Facilita a mudança de um sistema de unidades para outro

Sistemas MKS e MK*S: $\nu = m^2 s^{-1}$

Sistema CGS: $\nu = cm^2 s^{-1}$

3.7. Compressibilidade

- Propriedade do fluido de mudar de volume quando submetido a mudanças de pressão



A variação de volume (dV) é proporcional ao volume inicial e à variação de pressão ($V \cdot dP$)

$P \uparrow \quad V \downarrow$ (Se P aumenta, V diminui)

$$dV = -\alpha V dP$$

α – coeficiente de proporcionalidade volumétrica

Módulo de elasticidade (épsilon) $\epsilon = \frac{1}{\alpha}$

Se $dV = -\alpha V dP$

então

$$dV = -\frac{1}{\epsilon} V dP$$

$$\alpha = -\frac{dV}{V dP}$$

Análise dimensional:

$$\alpha = F^{-1} L^2$$

$$\varepsilon = F L^{-2} \quad (\text{Ver última coluna da tabela de propriedades da água})$$

Exemplo: mudança de volume da água submetida à mudança de pressão

Dados (Água)

$$T = 10^\circ\text{C}$$

$$V_1 = 1 \text{ m}^3$$

$$P_1 = 10000 \text{ kgf m}^{-2}$$

$$P_2 = 20000 \text{ kgf m}^{-2}$$

Pede-se:

V_2 (vol. final)

dV (variação de volume)

Tabela de propriedades da água:

$$T = 10^\circ\text{C} \quad \varepsilon = 2,09 \times 10^8 \text{ kgf m}^{-2}$$

$$dV = -\frac{1}{\varepsilon} V dP = -\frac{1}{2,09 \times 10^8} \times 1 \times (20000 - 10000)$$

$$dV = 4,78 \times 10^{-5} \text{ m}^3 = 47,8 \text{ ml}$$

Obs.: em problemas práticos de Hidráulica considera-se a água como líquido incompressível (ρ e γ constantes).

3.8. Coesão, adesão, tensão superficial e ângulo de contato

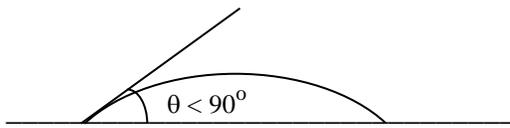
- a) Coesão: atração entre moléculas do próprio líquido
- b) Adesão: atração entre moléculas do líquido e do sólido com que está em contato
- c) Tensão superficial (σ): é o trabalho por unidade de área necessário para trazer as moléculas às superfícies do líquido.

- Ocorre quando a atração entre as moléculas do líquido é maior que a atração entre moléculas do líquido e do ar. A superfície de um líquido comporta-se como se estivesse coberta por uma película

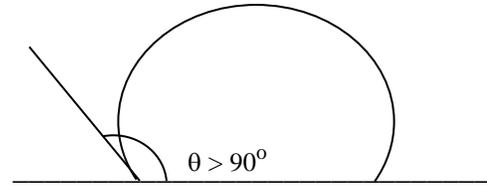
Análise dimensional:

$$\sigma = \frac{\text{trabalho}}{\text{área}} = \frac{F L}{L^2} = F L^{-1}$$

d) Ângulo de contato (θ):



Adesão > Coesão

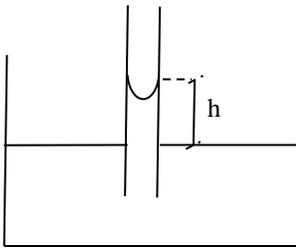


Coesão > Adesão

- Detergentes promovem redução do ângulo de contato
- Ceras protetoras aumentam o ângulo de contato
- Água no vidro: $\theta = 0^\circ$
- Mercúrio no vidro: $\theta = 148^\circ$

3.9. Capilaridade

- Fenômeno que ocorre quando se introduz um tubo de pequeno diâmetro em um recipiente com água. A água se eleva no tubo, além do nível original.



$$h = \frac{2 \sigma \cos \theta}{\gamma r}$$

<p>h = altura de elevação σ = coeficiente de tensão superficial θ = ângulo de contato líquido – sólido (tubo) γ = peso específico do líquido r = raio do capilar</p>
--

Aplicações práticas:

- Piezômetros: definição de diâmetro mínimo para evitar a capilaridade
- Solos: fenômeno de ascensão de água de camadas profundas
(uso em irrigação, drenagem e construção civil – impermeabilização)

3.10. Pressão (tensão) de vapor

É a pressão na qual o líquido entra em ebulição.

(Ver tabela de propriedades físicas da água)

- Moléculas escapam na superfície (evaporação) e exercem uma pressão sobre o próprio líquido;

- Quando a pressão na superfície do líquido é igual à pressão de vapor do mesmo, o líquido entra em ebulição
- Quanto menor a pressão atmosférica local, menor a temperatura de ebulição

Aplicações práticas:

- Panela de pressão: cozimento acima da pressão atmosférica
- Cavitação em bombas hidráulicas

3.11. Solubilidade dos gases em líquidos

William Henry, químico britânico (1775-1836):

- Lei de Henry: “A uma temperatura constante, a massa de um gás dissolvido num líquido em equilíbrio de solubilidade (saturado com o gás) é diretamente proporcional à pressão parcial do gás.”

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

Aplicações práticas:

- Água mineral com gás carbônico (CO₂):
 - Garrafa fechada ($P > P_{atm}$): sem bolhas (mais gás dissolvido)
 - Garrafa aberta ($P = P_{atm}$): bolhas saindo da água (menos gás dissolvido)
- Adução de água
 - Pontos altos: menor pressão e acúmulo de ar que reduz ou impede o escoamento

Exercício 1 (Para entregar)

Transformar as grandezas abaixo para o Sistema Internacional de Unidades:

a) 1 dina (força)

$$1 \text{ dina} = 1 \frac{g \cdot m}{s^2} \cdot \frac{1m}{100cm} \cdot \frac{1kg}{1000g} = 0,00001kg \cdot m \cdot s^{-2} = 10^{-5} N$$

b) 200 cm s⁻¹ (velocidade)

c) 72 m³ h⁻¹ (vazão)

d) 50 kgf m⁻² (pressão)

ANEXO

PROPRIEDADES FÍSICAS DA ÁGUA DOCE À PRESSÃO ATMOSFÉRICA ($g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$)

Temperatura	Peso específico	Massa específica	Viscosidade dinâmica	Viscosidade cinemática		Tensão superficial (água com o ar)	Pressão (tensão) de vapor	Módulo de elasticidade
T	γ	ρ	μ	ν		σ	hv	ϵ
°C	kgf.m ⁻³	kgf m ⁻⁴ s ²	kgf m ⁻² s	m ² s ⁻¹	Centistokes	kg m ⁻¹	mca	kgf m ⁻² (valores aproximados)
0	999,9	101,93	181 x 10 ⁻⁶	1,78 x 10 ⁻⁶	1,78	0,00771	0,062	1,99 x 10 ⁸
4	1000,0	101,94	160 x 10 ⁻⁶	1,57 x 10 ⁻⁶	1,57	0,00766	0,083	---
10	999,7	101,91	134 x 10 ⁻⁶	1,31 x 10 ⁻⁶	1,31	0,00757	0,125	2,09 x 10 ⁸
20	998,2	101,75	103 x 10 ⁻⁶	1,01 x 10 ⁻⁶	1,01	0,00743	0,239	2,18 x 10 ⁸
30	995,7	101,50	84 x 10 ⁻⁶	0,83 x 10 ⁻⁶	0,83	0,00726	0,433	2,20 x 10 ⁸
40	992,2	101,14	67 x 10 ⁻⁶	0,66 x 10 ⁻⁶	0,66	0,00710	0,753	2,21 x 10 ⁸
50	988,1	100,72	56 x 10 ⁻⁶	0,56 x 10 ⁻⁶	0,56	0,00690	1,258	2,22 x 10 ⁸
60	983,2	100,22	47 x 10 ⁻⁶	0,47 x 10 ⁻⁶	0,47	0,00676	2,033	2,23 x 10 ⁸
80	971,8	99,06	37 x 10 ⁻⁶	0,37 x 10 ⁻⁶	0,37	0,00638	4,831	---
100	958,4	97,70	28 x 10 ⁻⁶	0,29 x 10 ⁻⁶	0,29	0,00601	10,333	---

Nos cálculos habituais da Hidráulica feitos no sistema MK*S Técnico, toma-se $\gamma = 1000 \text{ kgf m}^{-3}$; $\rho = 102 \text{ kgf m}^{-4} \text{ s}^2$; $\nu = 1,01 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$

Para o gelo: 0°C, $\gamma = 916,7 \text{ kgf m}^{-3}$

-10°C, $\gamma = 918,6 \text{ kgf m}^{-3}$