

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

LEB 0472 – HIDRÁULICA

Prof. Fernando Campos Mendonça

Aula 1 – Apresentação da Disciplina

1 – Programa Resumido (Xerox p/ alunos)

2 – Cronograma

3 – Literatura recomendada

4 – Responsabilidade social

5 – Fases da aprendizagem

- Interesse (Aluno)

- Compreensão (Professor + aluno)

- Fixação (Hierarquia de Necessidades e Cone da Aprendizagem)

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

LER 0472 – HIDRÁULICA

Prof. Fernando Campos Mendonça

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

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. Conduitos livres (canais); propriedades e dimensionamento.

3 – Cronograma

Data	Aula / Prova	Assunto
6/8	Aula	Introdução Propriedades Físicas dos Fluidos e Sistemas de Unidades
13 e 20/8	Aula	Hidrostática
27 e 3/9	Aula	Hidrodinâmica
17/9	1ª Prova	---
24/09 e 01/10	Aula	Conduitos forçados
8/10 e 15/10	Aula	Bombas e sistemas de recalque
22/10	2ª Prova	---
29/10 e 5/11	Aula	Hidrometria
12 e 19/11	Aula	Conduitos livres
26/11	3ª Prova	---
03/12	Prova Rep./Sub.	Prova repositiva/substitutiva

4 – Avaliações

Serão efetuadas 3 provas teórico-práticas sendo:

1ª Prova	17/09
2ª Prova	22/10
3ª Prova	26/11

Além das 3 provas teórico-práticas, serão efetuados exercícios em classe e ou em horário extra-classe. A média final será dada pela expressão a seguir:

$$\text{Média final} = (\text{P1} + \text{P2} + \text{P3} + \text{média dos exercícios})/4$$

5 – Literatura recomendada

AZEVEDO NETO, M. F. Fernandez, R. Araujo, A. E. Ito. Manual de Hidráulica. São Paulo, Edgar Blücher, 1998 8ª edição 669p.

PORTO, R. de M. Hidráulica Básica. São Carlos, EESC/USP, 1998. 516p.

BERNARDO, S. Manual de Irrigação. 6ª edição. 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/Tarlei/leb472/>

<http://docentes.esalq.usp.br/tabotrel>

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

6 – Responsabilidade social

- Orçamento anual da ESALQ: R\$ 220 milhões
- Número de estudantes: 4.500
- Custo por aluno USP: R\$/ano 48.890,00
- Quem paga a conta: cidadão brasileiro (ICMS)
- Custo-benefício depende da dedicação de todos

5 – Fases da aprendizagem

- Interesse (Aluno)
- Compreensão (Professor + aluno)
- Fixação (Hierarquia de Necessidades e Cone da Aprendizagem)

Hierarquia de necessidades e Cone da aprendizagem



Cone da Aprendizagem		
Depois de duas semanas tendemos a nos lembrar de		Natureza do envolvimento
90% do que dizemos e fazemos	Colocando em prática	Ativa
	Simulando a experiência real	
	Fazendo uma apresentação dramática	
70% do que dizemos	Conversando	Ativa
	Participando de um debate	
50% do que ouvimos e vemos	Vendo a tarefa concluída no local	Passiva
	Assistindo a uma demonstração	
	Vendo uma exposição	
	Assistindo a um filme	
30% do que vemos	Olhando fotos	Passiva
20% do que ouvimos	Ouvindo palavras	
10% do que lemos	Lendo	

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:

- ramo puramente teórico, de análises matemáticas exatas baseadas nas leis da mecânica.
Limitação: nem sempre resolve problemas práticos.
- 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

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

^{*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)
- b) 36 km h⁻¹ (velocidade)
- c) 108 L h⁻¹ (vazão)
- d) 1000 kgf m⁻³ (massa específica)
- e) 1 dina (força)

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 indefida.

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:

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

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

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

$$\text{CGS: } \rho = \text{dina cm}^{-4} \text{s}^2$$

3.3. Peso específico (γ)

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

MK*S: kgf m⁻³

SI (MKS): N m⁻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.

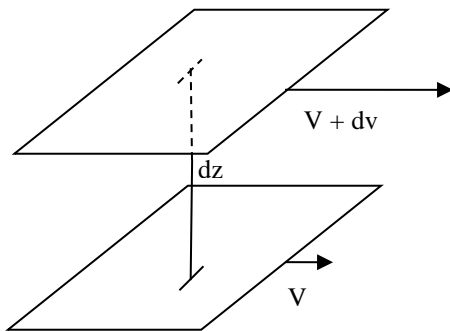
$$d = \frac{\rho_{\text{substância}}}{\rho_{\text{água}}}$$

Ex.: Quartzo d = 2,75

 Água (4°C) d = 1

3.5. Viscosidade dinâmica (μ , atrito interno; pronuncia-se “mi”)

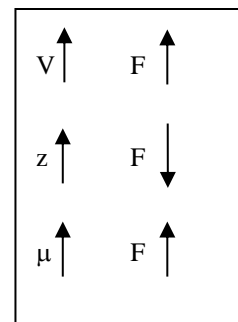
Propriedade dos fluidos responsável pela sua resistência à força cisalhante.



$$\frac{F}{A} \propto \frac{dV}{dz}$$

$$\frac{F}{A} = \mu \frac{dV}{dz}$$

$$F = \mu \cdot A \cdot \frac{dV}{dz}$$



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:

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

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 , pronuncia-se “ni”)

- Forma simplificada de apresentar a viscosidade

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \rho = \text{massa específica (massa/volume)}$$

Análise dimensional (sistema FLT):

- massa específica:

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

- viscosidade dinâmica:

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

- viscosidade cinemática:

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

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

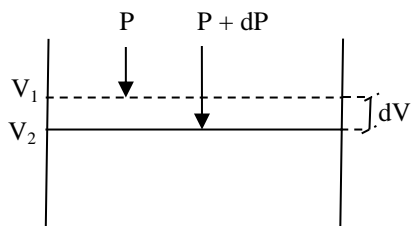
- Facilita a mudança de um sistema de unidades para outro

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

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

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)

$$\varepsilon = \frac{1}{\alpha}$$

Se $dV = \alpha V dP$

então

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

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

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:

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

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

$$dV = 4,784 \times 10^{-5} \text{ m}^3 = 47,84 \text{ ml}$$

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

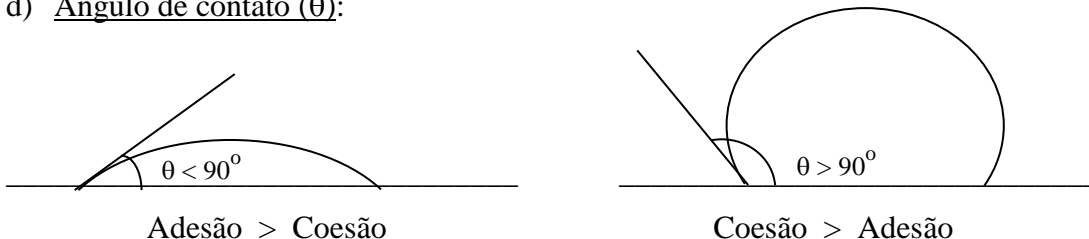
- a) Coesão: atração entre moléculas do próprio líquido
- b) Adesão: atração entre moléculas do líquido e do sólido com que está em contato
- c) Tensão superficial (σ): é o trabalho por unidade de área necessário para trazer as moléculas à superfície do líquido.

- 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:

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

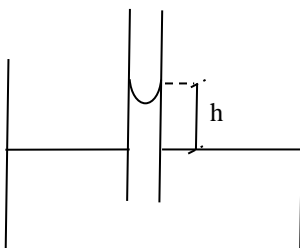
- d) Ângulo de contato (θ):



- 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:

- a) 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)
- b) Adução de água
 - Pontos altos: menor pressão e acúmulo de ar que reduz ou impede o escoamento

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 (valores aproximados)
T	γ	ρ	μ	ν	Centistokes	σ	e_s	ϵ
°C	kgf.m ⁻³	kgf m ⁻⁴ s ²	kgf m ⁻² s	m ² s ⁻¹		kg m ⁻¹	mca	kgf m ⁻²
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, $\gamma = 918,6 \text{ kgf m}^{-3}$

Pressão (de saturação) de vapor (kPa): $e_s = 0,61078 \cdot e^{\left(\frac{17,269T}{237,3+T}\right)}$

Pressão (de saturação) de vapor (mca): $e_s = 0,06230 \cdot e^{\left(\frac{17,269T}{237,3+T}\right)}$