

Fenômenos de Transporte

Aula 1 – Propriedades

Dirceu S. Reis Jr.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental
Universidade de Brasília

Date / Occasion

Tópicos

- 1 Grandezas, Unidades e Dimensões
- 2 O que é um Fluido?
- 3 Hipótese do Meio Contínuo
- 4 Medidas de Massa e Peso
 - Massa específica/Volume específico
 - Peso específico
 - densidade/gravidade específica
- 5 Viscosidade
- 6 Lei dos Gases Perfeitos
- 7 Pressão de vapor
- 8 Tensão superficial

Grandezas, Unidades e Dimensões

- Tipos de grandezas
 - ▶ Geométrica: ângulo, comprimento, área, volume
 - ▶ Cinemática: velocidade, aceleração, descarga
 - ▶ Dinâmica: massa, força, pressão, trabalho, potência
- Grandezas podem ser:

Fundamentais

Independentes de outras grandezas

Derivadas

Dependem de grandezas fundamentais

- Unidade: forma de atribuir número à grandeza

Grandezas Fundamentais

| Grandeza | Símbolo | Unidades SI |
|-----------------------|---------|-----------------|
| Massa | M | Kg (quilograma) |
| Comprimento | L | M (metro) |
| Tempo | T | S (segundo) |
| Temperatura | theta | K (kelvin) |
| Corrente elétrica | I | A (ampere) |
| Quantidade de luz | C | Cd (candela) |
| Quantidade de matéria | N | mol (mol) |

Grandezas Derivadas

- $[A] = L^2$
- $[\text{Vol}] = L^3$
- $[V] = LT^{-1}$
- $[a] = LT^{-2}$
- $[Q] = L^3 T^{-1}$

- $[\rho] = ML^{-3}$
- $[\gamma] = ML^{-2} T^{-2}$
- $[F] = [m \times a] = MLT^{-2}$
- $[\tau] = [F/A] = ML^{-1} T^{-2}$
- $[E] = ML^2 T^{-2}$

Princípio da Homogeneidade Dimensional

Todos os **termos** de soma de uma equação precisam ter as mesmas **dimensões!!!!**

$$z + \frac{p}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} = \text{constante} \quad (1)$$

Verificação da dimensão

$$\begin{aligned} [z] &= L \\ \left[\frac{p}{\gamma} \right] &= \frac{ML^{-1}T^{-2}}{ML^{-2}T^{-2}} = L \\ \left[\frac{V^2}{2g} \right] &= \frac{L^2T^{-2}}{LT^{-2}} = L \end{aligned}$$

Princípio da Homogeneidade Dimensional

Todos os **termos** de soma de uma equação precisam ter as mesmas **dimensões**!!!!

$$z + \frac{p}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} = \text{constante} \quad (1)$$

Verificação da dimensão

$$\begin{aligned} [z] &= L \\ \left[\frac{p}{\gamma} \right] &= \frac{ML^{-1}T^{-2}}{ML^{-2}T^{-2}} = L \\ \left[\frac{V^2}{2g} \right] &= \frac{L^2T^{-2}}{LT^{-2}} = L \end{aligned}$$

Definição de um fluido

O que é um fluido?

Qual é a diferença entre um **fluido** e um **sólido**?

Principais diferenças

Sólido

- espaço intermolecular pequeno
- forças intermoleculares intensas e coesivas
- difícil de deformar
- capaz de manter sua forma

Líquido

- espaçamento maior entre moléculas
- forças intermoleculares fracas (em relação ao sólido)
- facilmente deformável

Gases

- espaçamento **ainda maior** entre moléculas
- forças intermoleculares desprezíveis
- facilmente deformável e compressível

Comportamento – tensão de cisalhamento

Sólidos

Deforma mas não escoar: tensão \propto deformação

Fluidos

Deforma continuamente: tensão \propto taxa de deformação

Hipótese do Meio Contínuo

Estrutura molecular

Apesar da **estrutura molecular** de um fluido explicar muito do seu comportamento, **não é possível analisar** o escoamento de um fluido por meio do comportamento de suas moléculas.

Estratégia

O comportamento do fluido é caracterizado através de **valores médios** (num dado volume pequeno), também chamado de **macroscópicos** da quantidade de interesse (massa, velocidade, energia etc).

Hipótese do Meio Contínuo

Vantagens

- Permite relacionar a **propriedade** como função do **ponto**
- **Variação** da propriedade é **suave** (sem saltos)

Premissa

Sistema precisa ser muito maior do que o espaçamento entre moléculas. Exemplo:

- diâmetro da molécula de oxigênio: $3.0 \times 10^{-6} \text{ m}$
- distância entre moléculas $\approx 6.3 \times 10^{-8} \text{ m}$
- Há 2.5×10^6 moléculas *em* 1 mm^3 .

Massa específica (ρ)

Massa específica

- Massa da substância contida numa unidade de volume.
- Caracteriza a massa de um sistema fluido

$$\rho = \frac{\text{massa}}{\text{vol}} \text{ (kg/m}^3 \text{ no SI)}$$

Volume específico (ν)

- Volume ocupado por uma unidade de massa da substância.
- Volume específico é o inverso da massa específica

$$\nu = \frac{\text{vol}}{\text{massa}} \text{ (m}^3/\text{kg no SI)}$$

Massa específica de líquidos e gases

- Quem possui maior massa específica (líquidos)?
 - ▶ Álcool etílico
 - ▶ Gasolina
 - ▶ Mercúrio
 - ▶ Óleo SAE 30
 - ▶ Água do mar
- Quem possui maior massa específica (gases)?
 - ▶ Ar padrão
 - ▶ Dióxido de Carbono
 - ▶ Hélio
 - ▶ Hidrogênio
 - ▶ Metano
 - ▶ Nitrogênio
 - ▶ Oxigênio

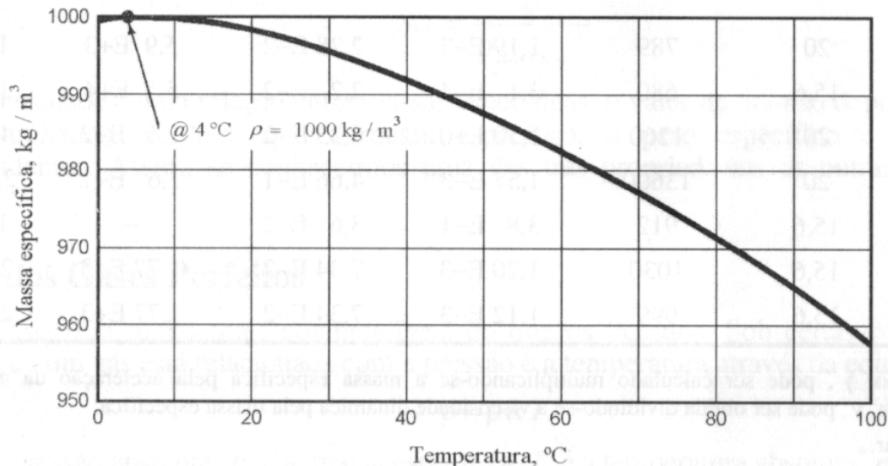
Massa específica de líquidos e gases

| Fluido | Temperatura (C) | Massa específica (kg/m ³) |
|----------------|-----------------|---------------------------------------|
| Álcool etílico | 20 | 789 |
| Gasolina | 15.6 | 680 |
| Glicerina | 20 | 1260 |
| Mercúrio | 20 | 13600 |
| Óleo SAE 30 | 15.6 | 912 |
| Água do mar | 15.6 | 1030 |
| Água | 15.6 | 999 |

Massa específica de líquidos e gases

| Fluido | Temperatura (C) | Massa específica (kg/m ³) |
|--------------------|-----------------|---------------------------------------|
| Ar padrão | 15 | 1.23 |
| Dióxido de carbono | 20 | 1.83 |
| Hélio | 20 | 1.66E-1 |
| Hidrogênio | 20 | 8.38E-2 |
| Metano | 20 | 6.67E-1 |
| Nitrogênio | 20 | 1.16 |
| Oxigênio | 20 | 1.33 |

Massa específica de líquidos e gases



Peso Específico (γ)

Peso específico

- Peso da substância contida numa unidade de volume.
- Caracteriza o peso de um sistema fluido

$$\gamma = \rho g \text{ (N/m}^3 \text{ no SI)}$$

Densidade ou gravidade específica

densidade

É a razão entre a massa específica de um fluido e a massa específica da água a 4°C.

$$\text{densidade} = \frac{\rho}{\rho_{H_2O \text{ a } 4^{\circ}\text{C}}}$$

Mais uma propriedade

- Mover-se no ar é mais fácil do que mover-se na água;
- Mover-se no óleo é ainda mais difícil do que mover-se na água;
- Fluidos com massa específica similares podem ter resistência ao escoamento bem diferentes;
- Que propriedade é essa relacionada com resistência ao escoamento???

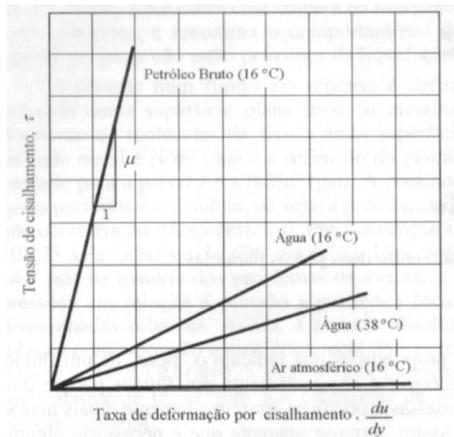
Veja os vídeos

Equacionamento

Fluidos Newtonianos

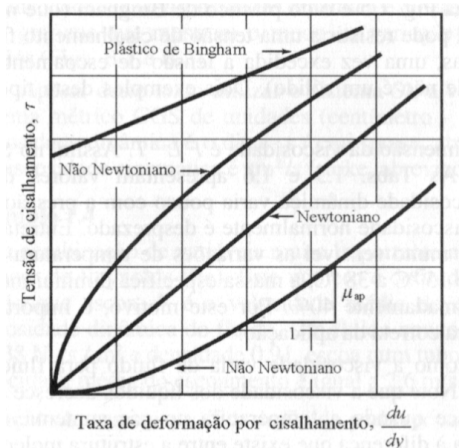
Viscosidade depende:

- do fluido
- e da temperatura

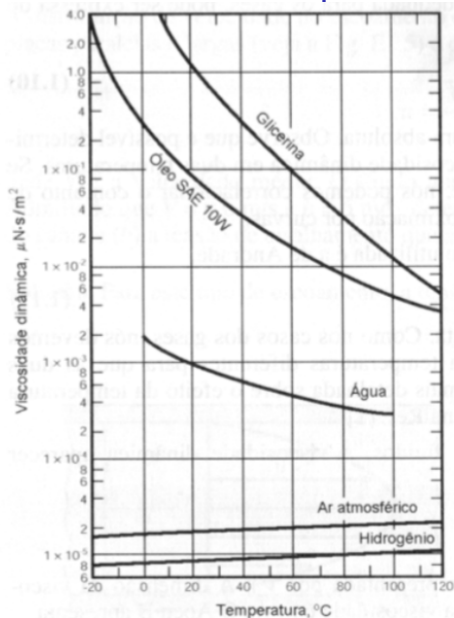


Fluidos não Newtonianos

- Dilatante: viscosidade aparente aumenta com a taxa de deformação
- Pseudoplástico: viscosidade aparente diminui com a taxa de deformação
- Plástico de Bingham: Comporta-se como sólidos para pequenos valores de tensão de cisalhamento, e a partir de um dado valor, comporta-se como fluido.



Viscosidade vs Temperatura



Viscosidade cinemática

Viscosidade cinemática (ν)

- $\nu = \mu / \rho$
- $[\mu] = ML^{-1}T^{-1}$
- $[\rho] = ML^{-3}$
- $[\nu] = \frac{ML^{-1}T^{-1}}{ML^{-3}} = L^2T^{-1} \text{ (m}^2/\text{s no SI)}$

Viscosímetro

- Ver vídeos
- Exercício relacionado com viscosímetro

Lei dos gases perfeitos

Diferentes expressões

$$PV = nR_u T$$

$$PV = NkT$$

$$P = \frac{nR_u}{V} T = \rho RT$$

P = pressão (Pascal); V = volume (m³)

n = número de moles (1 mol contém 6.022×10^{23} moléculas)

R_u = constante universal dos gases ($R_u = 8.3 \text{ J/mol.K}$)

T = temperatura em graus Kelvin (K)

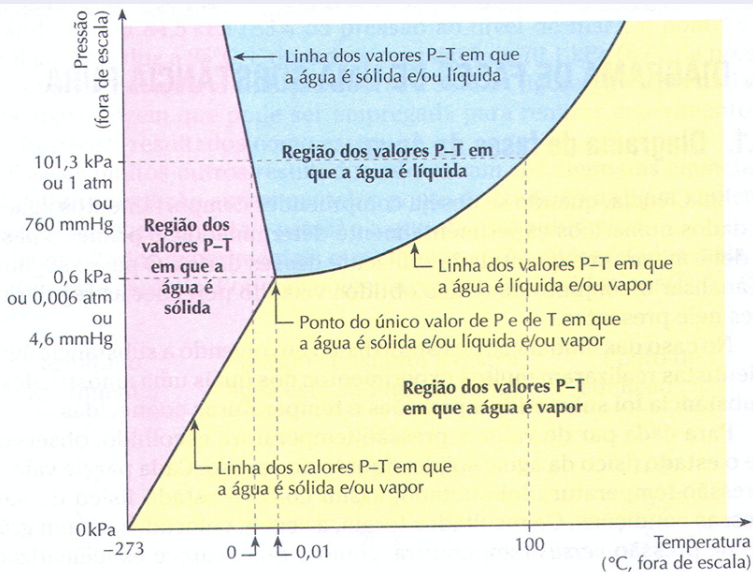
$k = nR_u/N = R_u/N_a = 1.38 \times 10^{-23} \text{ kg}$

$R = R_u/M$ depende do gás

M = massa molar

Tensão de vapor

Diagrama de fase



Pressão de vapor

Definição

- Líquido num compartimento fechado
- Moléculas com energia se soltam do líquido
- Moléculas de gás podem voltar para o líquido
- no equilíbrio:
 - ▶ moléculas que se soltam do líquido são iguais a
 - ▶ moléculas de gás que voltam para o líquido
 - ▶ pressão do gás = pressão de vapor

Pressão de vapor

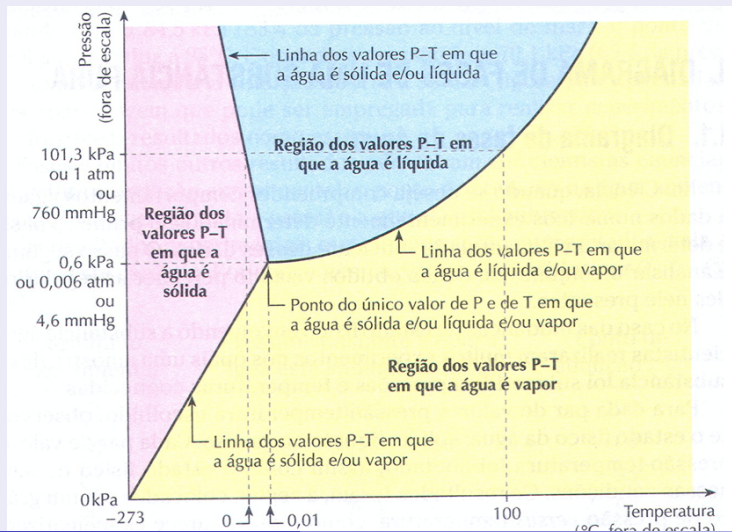
Fatores que afetam a pressão de vapor

- temperatura do líquido:
Quanto maior a temperatura, mais facilmente a molécula se desprende
- pressão:
Quanto menor a pressão, mais facilmente a molécula se desprende

Pressão de vapor

Relação entre pressão de vapor e ponto de ebulição

- se $P = 1 \text{ atm} \rightarrow$ ebulição ocorre quando $T = 100^\circ\text{C}$



Pressão de vapor

Relação entre pressão de vapor e ponto de ebulição

- se $P = 1 \text{ atm} \rightarrow$ ebulição ocorre quando $T = 100^\circ\text{C}$
- Nesse caso, $P_v(T = 100) = 101.3 \text{ kPa}$
- Ebulição ocorre quando $P_v = P_{\text{ambiente}}$
- Em locais de grande elevação, ebulição ocorre a temp menores que 100°C .

Pressão de vapor

Table A.8

Properties of Water (SI Units)

| Temperature, T (°C) | Density, ρ (kg/m ³) | Dynamic Viscosity, μ (N · s/m ²) | Kinematic Viscosity, ν (m ² /s) | Surface Tension, σ (N/m) | Vapor Pressure, p_v (kPa) | Bulk Modulus, E_v (GPa) |
|--------------------------|---|--|--|---------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| 0 | 1000 | 1.76E-03 | 1.76E-06 | 0.0757 | 0.661 | 2.01 |
| 5 | 1000 | 1.51E-03 | 1.51E-06 | 0.0749 | 0.872 | |
| 10 | 1000 | 1.30E-03 | 1.30E-06 | 0.0742 | 1.23 | |
| 15 | 999 | 1.14E-03 | 1.14E-06 | 0.0735 | 1.71 | |
| 20 | 998 | 1.01E-03 | 1.01E-06 | 0.0727 | 2.34 | 2.21 |
| 25 | 997 | 8.93E-04 | 8.96E-07 | 0.0720 | 3.17 | |
| 30 | 996 | 8.00E-04 | 8.03E-07 | 0.0712 | 4.25 | |
| 35 | 994 | 7.21E-04 | 7.25E-07 | 0.0704 | 5.63 | |
| 40 | 992 | 6.53E-04 | 6.59E-07 | 0.0696 | 7.38 | |
| 45 | 990 | 5.95E-04 | 6.02E-07 | 0.0688 | 9.59 | |
| 50 | 988 | 5.46E-04 | 5.52E-07 | 0.0679 | 12.4 | 2.29 |
| 55 | 986 | 5.02E-04 | 5.09E-07 | 0.0671 | 15.8 | |
| 60 | 983 | 4.64E-04 | 4.72E-07 | 0.0662 | 19.9 | |
| 65 | 980 | 4.31E-04 | 4.40E-07 | 0.0654 | 25.0 | |
| 70 | 978 | 4.01E-04 | 4.10E-07 | 0.0645 | 31.2 | |
| 75 | 975 | 3.75E-04 | 3.85E-07 | 0.0636 | 38.6 | |
| 80 | 972 | 3.52E-04 | 3.62E-07 | 0.0627 | 47.4 | |
| 85 | 969 | 3.31E-04 | 3.41E-07 | 0.0618 | 57.8 | |
| 90 | 965 | 3.12E-04 | 3.23E-07 | 0.0608 | 70.1 | 2.12 |
| 95 | 962 | 2.95E-04 | 3.06E-07 | 0.0599 | 84.6 | |
| 100 | 958 | 2.79E-04 | 2.92E-07 | 0.0589 | 101 | |

Pressão de vapor – Cavitação

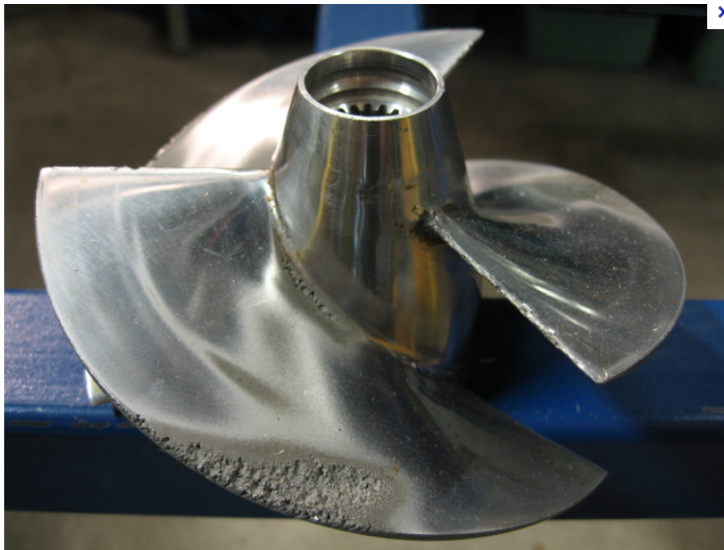
Definição

Quando um líquido escoar, é possível que a pressão fique abaixo da pressão de vapor do líquido a uma dada temperatura. Há formação de bolhas no escoamento. Quando as bolhas entram em uma região de maior pressão, entram em colapso, podendo causar danos à estrutura.

Pressão de vapor – Cavitação



Pressão de vapor – Cavitação



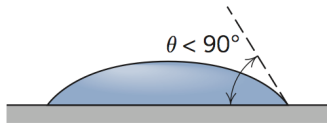
Pressão de vapor – Cavitação



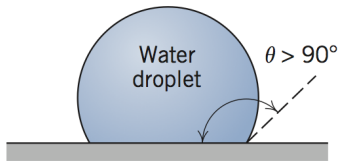
Pressão de vapor – Cavitação



Tensão superficial

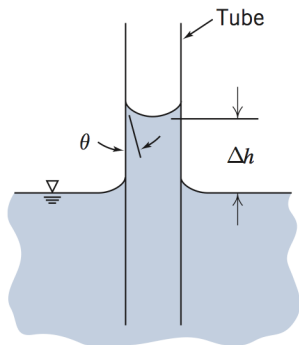


(a) A “wetted” surface

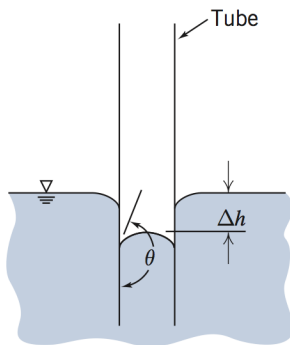


(b) A nonwetted surface

Tensão superficial

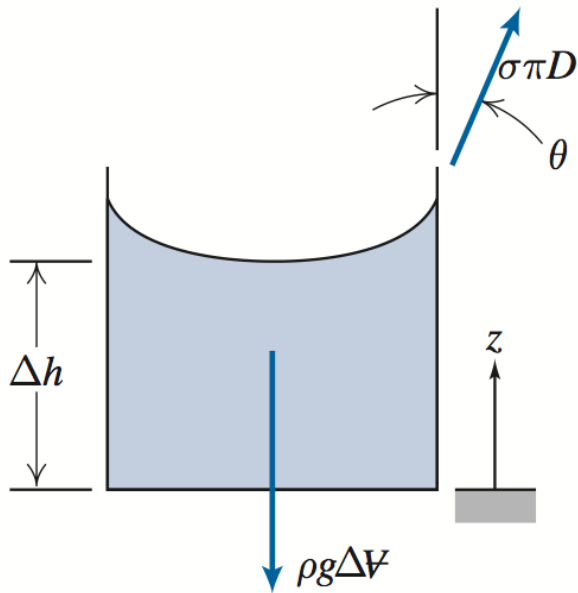


(a) Capillary rise ($\theta < 90^\circ$)

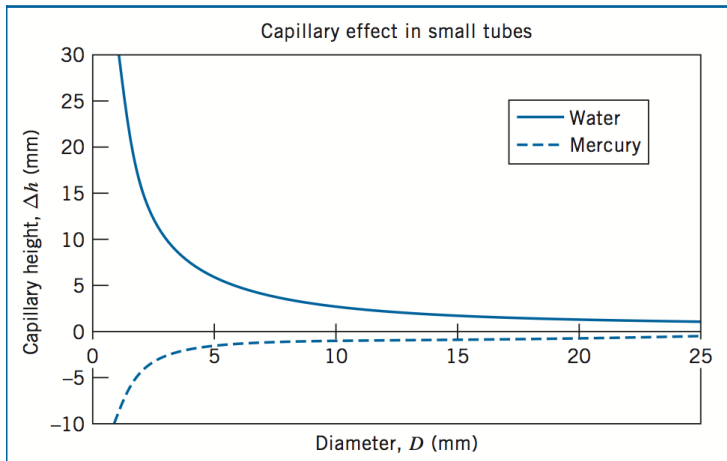


(b) Capillary depression ($\theta > 90^\circ$)

Tensão superficial



Tensão superficial



Tensão superficial

Surface Tension of Common Liquids at 20°C

| Liquid | Surface Tension, σ (mN/m) ^a | Contact Angle, θ (degrees) |
|-------------------------|--|-----------------------------------|
| (a) In contact with air | | |
| Benzene | 28.9 | |
| Carbon tetrachloride | 27.0 | |
| Ethanol | 22.3 | |
| Glycerin | 63.0 | |
| Hexane | 18.4 | |
| Kerosene | 26.8 | |
| Lube oil | 25–35 | |
| Mercury | 484 | 140 |
| Methanol | 22.6 | |
| Octane | 21.8 | |
| Water | 72.8 | ~0 |

