



FENÔMENOS DE TRANSPORTE MECÂNICA DOS FLUIDOS

**CONSIDERAÇÕES E
PROPRIEDADE DOS FLUIDOS**

UFERSA – Universidade Federal Rural do Semi-Árido

Prof. Roberto Vieira Pordeus

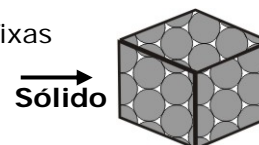
MECÂNICA DOS FLUIDOS

A Mecânica dos Fluidos é a parte da mecânica aplicada que estuda o comportamento dos fluidos em repouso e em movimento. Obviamente, o escopo da mecânica dos fluidos abrange um vasto conjunto de problemas. Por exemplo, estes podem variar do estudo do escoamento de sangue nos capilares (que apresentam diâmetro da ordem de poucos microns) até o escoamento de petróleo através de um oleoduto (o do Alaska apresenta diâmetro igual a 1,2 m e comprimento aproximado de 1300 km).

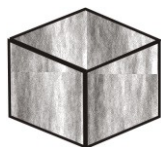
No desenvolvimento dos princípios de mecânica dos fluidos, algumas propriedades dos fluidos representam as principais funções, outras somente funções menores ou nenhuma. Na estática dos fluidos, o peso específico é a propriedade mais importante, ao passo que, no escoamento de fluidos, a massa específica e a viscosidade são propriedades predominantes.

Características dos fluidos. A matéria apresenta-se no estado sólido ou no estado fluido, este abrangendo os estados **líquido** e **gasoso**. O espaçamento e a atividade intermoleculares são maiores nos gases, menor nos líquidos e muito reduzido nos sólidos.

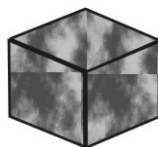
Sólidos. Moléculas ou cristais oscilam em torno de posições fixas



Fluidos. Moléculas trocam de posição. Tomam a forma do recipiente.



Líquido



Gás

FIGURA 1 Arranjo molecular dos sólidos, líquidos e gases

Líquidos possuem uma interação intermolecular forte (pontes de van der Waals) e por isso eles tomam a forma do recipiente, porém restringindo-se a um volume finito.

Gases possuem interação molecular fraca e por isso, além de tomarem a forma do recipiente, o preenchem completamente.

Definição de um fluido. Fluidos são substâncias que são capazes de escoar e cujo volume toma a forma de seu recipiente. Quando em equilíbrio, os fluidos não suportam **forças tangenciais** ou **cisalhantes**. Todos os fluidos possuem um certo grau de compressibilidade e oferecem pequenas resistência à mudança de forma.

Os fluidos podem ser divididos em líquidos e gases. A principal diferença entre eles são: (a) os **líquidos** são praticamente incompressíveis, ao passo que os **gases** são compressíveis e muitas vezes devem ser assim tratados e (b) os líquidos ocupam **volumes** definidos e tem superfícies livres ao passo que uma dada massa de **gás** expande-se até ocupar todas as parte do recipiente.

Tensão de Cisalhamento. A força ΔF que age em um área ΔA pode ser decomposta em uma componente normal ΔF_n e uma componente tangencial ΔF_t , como mostra a Fig. 2.

A força dividida pela área na qual ela age é chamada tensão. O vetor força dividida pela área é o **vetor de tensão**, a componente normal da força dividida pela área é a **tensão normal** e a força tangencial dividida pela área é a **tensão de cisalhamento**. Nessa discussão estamos interessados na tensão de cisalhamento τ que, matematicamente, é definida como

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_t}{\Delta A} \quad \text{tensão de cisalhamento} \quad (1)$$

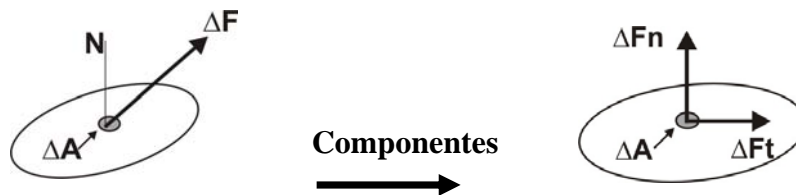


FIGURA 2 Componentes normal e tangencial de uma força

Fluidos são líquidos e gases que se movem sob a ação de uma **tensão de cisalhamento** não importando o quão pequena seja essa tensão.

No estudo da mecânica dos fluidos é conveniente assumir que ambos, gases e líquidos, são distribuídos continuamente pela região de interesse, isto é, o fluido é tratado como um **contínuo**. A propriedade primária usada para determinar se a idéia de contínuo é apropriada é a massa específica ρ , definida por

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (2)$$

Na qual Δm é a massa incremental contida no volume ΔV . A massa específica do ar nas condições da atmosfera padrão, ou seja, à pressão de 101,3 kPa (14,7 psi) e à temperatura de 15 °C (59 °F), é 1,23 kg m⁻³ (0,00238 slug ft⁻³). Para a água, o valor normal da massa específica é de 1000 kg m⁻³ (1,94 slug ft⁻³)

Segunda classificação dos fluidos. Esta classificação é feita em relação a sua massa específica e origina.

Fluidos incompressíveis. São aqueles que para qualquer variação de pressão não ocorre variação de seu volume ($\rho = \text{constante}$).

Fluidos compressíveis. São aqueles que para qualquer variação de pressão ocorre variações sensíveis de seu volume, ($\rho \neq \text{constante}$).

Fluido como meio lubrificante

Para um corpo deslizar sobre outro, deve-se vencer uma força adversa denominada: força de atrito.

DIMENSÕES, UNIDADES E QUANTIDADES FÍSICAS

Antes de iniciarmos estudos mais detalhados da mecânica dos fluidos, vamos discutir as dimensões e unidade que serão usadas em toda a extensão do curso. Quantidades físicas requerem descrições quantitativas quando se resolve um problema de engenharia. A massa específica é uma destas quantidades físicas. É a medida de uma massa contida em uma unidade de volume. A massa específica não representa, porém, a dimensão fundamental. Há nove quantidades que são consideradas dimensões fundamentais: comprimento, massa, tempo, temperatura, quantidade de uma substância, corrente elétrica, intensidade luminosa, ângulo plano e ângulo sólido. As dimensões de todas as outras quantidades podem ser expressas em termos das

dimensões fundamentais. Por exemplo, a quantidade “força” pode ser relacionada às dimensões fundamentais de massa, comprimento e tempo. Para fazer isso usamos a segunda lei de Newton.

$$F = m a \quad (3)$$

Escrevendo em termo de dimensões, temos

$$F = \frac{ML}{T^2} \quad (4)$$

em que F, M, L e T são as dimensões de força, massa, comprimento e tempo, respectivamente.

As dimensões fundamentais e suas unidades estão apresentadas na Tabela 1; algumas unidades derivadas apropriadas à mecânica dos fluidos são mostradas na Tabela 2.

Outras unidades aceitáveis são o hectares (ha), que vale 10 000 m², usado para grandes áreas; a tonelada métrica (t), que corresponde a 1000 kg, usada para grandes massas; e o litro (l), que vale 0,001 m³. Também a massa específica é ocasionalmente expressa como grama por litro (g/l).

TABELA1 Dimensões fundamentais e sua unidades

Quantidade	Dimensões	Unidades SI		Unidades Inglesas	
Comprimento l	L	metro	m	pé	ft
Massa m	M	quilograma	kg	slug	(slug)
Tempo t	T	segundo	s	segundo	(s)
Corrente elétrica i		ampère	A	ampère	A
Temperatura T	Θ	kelvin	K	Rankine	°R
Quantidade da substância	M	kg-mol	kg-mol	lb-mol	lb-mol
Intensidade luminosa		candela	cd	candela	cd
Ângulo plano		radiano	rad	radiano	rad
Ângulo sólido		esferorradiano	sr	esferorradiano	sr

Nos cálculos químicos o mol é, muitas vezes, uma unidade mais conveniente do que o quilograma. Em alguns casos é também útil na mecânica dos fluidos. Para gases, o

quilogra-mol (kg-mol) é a quantidade que preenche o mesmo volume de 32 quilogramas de oxigênio à mesma temperatura e pressão. A massa (em quilogramas) de um gás preenchendo aquele volume é igual ao peso molecular do gás; por exemplo, a massa de 1 kg-mol de nitrogênio é 28 quilogramas.

Sistemas de unidades. Normalmente, além de termos que descrever qualitativamente uma quantidade, é necessário quantificá-la. Por exemplo, a afirmação – nós medimos a largura desta página e concluímos que ela tem 10 unidades de largura – não tem significado até que a unidade de comprimento seja definida. Se nós indicarmos que a unidade de comprimento é o metro e definirmos o metro como um comprimento padrão, nós estabelecemos um sistema de unidade para o comprimento (e agora nós podemos atribuir um valor numérico para a largura da página). Adicionalmente ao comprimento, é necessário estabelecer uma unidade para cada quantidade física básica significativa aos nossos problemas (força, massa, tempo e temperatura). Existem vários sistemas de unidades em uso e nós consideraremos apenas dois dos sistemas utilizados na engenharia.

TABELA 2 Unidades derivadas

<i>Quantidade</i>	<i>Dimensão</i>	<i>Unidade SI</i>	<i>Unidade Inglesa</i>
Área A	L^2	m^2	ft^2
Volume V	L^3	m^3	ft^3
		l (litro)	
Velocidade V	L/T	m/s	ft/s
Aceleração a	L/T^2	m/s^2	ft/s^2
Velocidade angular ω	T^{-1}	s^{-1}	s^{-1}
Força F	ML/T^2	$kg.m/s^2$	$slug.ft/s^2$
		N (newton)	lb (libra)
Massa específica ρ	M/L^3	kg/m^3	$slug/ft^3$
Peso específico γ	M/L^2T^2	N/m^3	lb/ft^3
Frequência f	T^{-1}	s^{-1}	s^{-1}
Pressão p	M/LT^2	N/m^2	lb/ft^2
		Pa (Pascal)	
Tensão τ	M/LT^2	N/m^2	lb/ft^2
		Pa (Pascal)	
Tensão superficial σ	M/T^2	N/m	lb/ft
Trabalho W	ML^2/T^2	$N.m$	$lb.ft$
		J (joule)	
Energia E	ML^2/T^2	$N.m$	$lb.ft$
		J (joule)	
Taxa de transferência de calor Q	ML^2/T^3	J/s	Btu/s
Toque T	ML^2/T^2	$N.m$	$lb.ft$
Potência P	ML^2/T^3	J/s	$ft.lb/s$
		W (watt)	
Viscosidade μ	M/LT	$N.s/m^2$	$lb.s/ft^2$
Escoamento de massa m	M/T	kg/s	$slug/s$
Taxa de escoamento (vazão) Q	L^3/T	m^3/s	ft^3/s
Calor específico c	$L^2/T^2\Theta$	$J/kg.K$	$Btu/slug.^{\circ}R$
Condutividade K	$ML/T^3\Theta$	$W/m.K$	$lb/s.^{\circ}R$

Sistema Britânico Gravitacional. Neste sistema, a unidade de comprimento é o pé (ft), a unidade de tempo é o segundo (s), a unidade de força é a libra força (lbf), a

unidade de temperatura é o grau Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$) (ou o grau Rankine ($^{\circ}\text{R}$) para temperaturas absolutas). Estas duas unidades de temperatura estão relacionadas por

$$^{\circ}\text{R} = ^{\circ}\text{F} + 459,67$$

A unidade de massa, conhecida como *slug*, é definida pela segunda lei de Newton (força = massa x aceleração). Assim,

$$1 \text{ lbf} = (1 \text{ slug}) (1 \text{ ft s}^{-2})$$

Esta relação indica que a força de 1 libra atuando sobre a massa de 1 *slug* provocará uma aceleração de 1 ft s^{-2} .

O peso W (que é a força devida a aceleração da gravidade) de uma massa m é dado pela equação

$$W = m g \quad (5)$$

No sistema britânico gravitacional.

$$W(\text{lbf}) = m(\text{slug}) g(\text{ft} / \text{s}^2) \quad (6)$$

Como a aceleração da gravidade padrão é $32,174 \text{ ft s}^{-2}$, temos que a massa de 1 *slug* pesa 32,174 lbf no campo gravitacional padrão (normalmente este valor é aproximado para 32,2 lbf)

Sistema Internacional (SI). A décima - primeira Conferência Geral de Pesos e Medidas (1960), organização internacional responsável para a manutenção de normas precisas e uniformidade de medidas, adotou oficialmente o Sistema Internacional de Unidades. Este sistema, comumente conhecido como SI, tem sido adotado em quase todo mundo e espera-se que todos os países o utilizem a longo prazo. Neste sistema, a unidade de comprimento é o metro (m), a de tempo é o segundo (s), a de massa é o quilograma (kg) e a de temperatura é o kelvin (K). A escala de segundo (s), a escala de temperatura Kelvin é uma escala absoluta e está relacionada com a escala Celsius ($^{\circ}\text{C}$) pela relação

$$K = ^{\circ}\text{C} + 273,15 \quad (7)$$

Apesar da escala Celsius não pertencer ao SI, é usual especificar a temperatura em graus Celsius quando estamos trabalhando no SI.

A unidade de força no SI é o Newton (N) e é definida pela segunda lei de Newton.

A segunda lei de Newton relaciona a força total agindo sobre um corpo rígido à sua massa e aceleração. Ela é expressa como:

$$\sum \mathbf{F} = m \mathbf{a} \quad (8)$$

Consequentemente a força necessária para acelerar a massa de 1 quilograma a 1 metro por segundo ao quadrado, na direção da força resultante, é 1 Newton; usando unidades inglesas, a força necessária para acelerar a massa de 1 *slug* a 1 ft por segundo ao quadrado na direção da força resultante é de 1 libra. Isso nos permite relacionar as unidades por

$$1 \text{ N} = (1 \text{ kg}) (1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}) \quad \text{lb} = \text{slug} \cdot \text{ft} \cdot \text{s}^{-2}$$

Que estão incluídas na Tabela 3. Essas relações entre unidades são usadas frequentemente na conversão de unidades. No SI o peso é sempre expresso em newtons, nunca em quilogramas.

No sistema inglês massa é sempre expressa em *slug* e nunca em libras. Para relacionar peso com massa usamos

$$\mathbf{W} = m \mathbf{g} \quad (9)$$

em que g é a gravidade local.

Assim, uma força de 1 N atuando numa massa de 1 kg proporcionará uma aceleração de 1 m s^{-2} . A aceleração da gravidade padrão no SI é $9,807 \text{ m s}^{-2}$ (normalmente aproximamos este valor por $9,81 \text{ m s}^{-2}$). Com esta aproximação, a massa de 1 kg pesa 9,81 N sob a ação da gravidade padrão. Note que o peso e a massa são diferentes tanto qualitativamente como quantitativamente. A unidade de trabalho no SI é o joule (J). Um joule é o trabalho realizado quando o ponto de aplicação de uma força de 1 N é deslocado através da distância de 1 m na direção de aplicação da força. Assim,

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (10)$$

A unidade de potência no SI é o watt (W). Ela é definida como um joule por segundo. Assim,

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J s}^{-1} = 1 \text{ N} \cdot \text{m s}^{-1} \quad (11)$$

Exemplo 1. Uma força de 400 N age verticalmente para cima e uma força de 600 N age para cima num ângulo de 45° sobre uma massa de 100 kg (Figura 3). Calcular a componente vertical da aceleração. A aceleração local da gravidade é 9,81 m s⁻².

Solução: O primeiro passo para resolver o problema envolvendo forças é desenhar um diagrama do corpo livre com todas as forças agindo nele, como mostra a Figura ao lado.

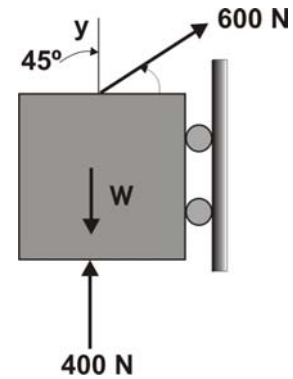
Em seguida, aplicar a segunda lei de Newton. Ela relaciona a força resultante agindo na massa à aceleração e é expressa como

$$\sum F_y = m a_y$$

Usando os componentes apropriados na direção y temos

$$400 + 600 \sin 45^\circ - 100 \times 9,81 = 100 \cdot a_y$$

$$a_y = -1,567 \text{ m / s}^2$$



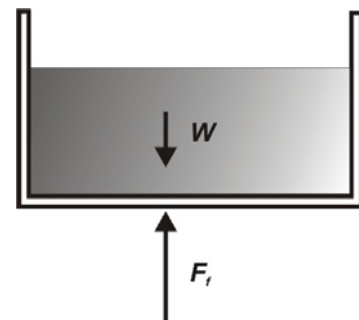
Exemplo 2. Um tanque contém 36 kg de água e está apoiado no chão de um elevador. Determine a força que o tanque exerce sobre o elevador quando este movimenta para cima com uma aceleração de 7 ft s⁻².

Solução. A Figura ao lado mostra o diagrama de corpo livre para o tanque. Note que W é o peso do tanque e da água. A expressão da segunda lei de Newton, equação (3) é

$$\sum F = m a$$

Aplicando esta lei ao problema, temos

$$F_f - W = m a$$



Note que o sentido para cima foi considerado como positivo. Como $W = m g$, a Eq. (9) pode ser escrita como

$$F_f = m(g + a)$$

Nós precisamos decidir sobre o sistema de unidades que vamos trabalhar, e termos certeza de que todos os dados estão expressos neste sistema de unidades, antes de substituir qualquer número na Eq. (3). Se nós quisermos conhecer o valor de F_f em newtons, é necessário exprimir todas as quantidades no SI. Assim,

$$F_f = 36 \text{ kg} [9,81 \text{ m s}^{-2} + (7 \text{ ft s}^{-2})(0,3048 \text{ m ft}^{-1})]$$
$$F_f = 430 \text{ kg.m s}^{-2}$$

Como $1\text{N} = 1 \text{ kg} . \text{ m s}^{-2}$, temos que F_f é igual a 430 N (atua no sentido positivo). O sentido da força que atua no elevador é para o solo porque a força mostrada no diagrama de corpo livre é a força que atua sobre o tanque. Tome cuidado para não misturar unidades e causar grandes erros quando você não estiver trabalhando no SI.

A Tabela 3 mostra os prefixos que indicam os múltiplos e as frações das unidades utilizada no SI. Por exemplo, a notação kN deve ser lida como “kilonewtons” e significa 10^3 N. De modo análogo, mm indica “milímetros”, ou seja, 10^{-3} m. O centímetro não é aceito como unidade de comprimento no SI e, assim, os comprimentos serão expressos em milímetros ou metros.

TABELA 3. Prefixos utilizados no SI

<i>Fator de Multiplicação da Unidade</i>	<i>Prefixos</i>	<i>Símbolo</i>
10^{12}	tera	T
10^9	giga	G
10^6	mega	M
10^3	kilo	k
10^2	hecto	h
10	deca	de
10^{-1}	deci	d
10^{-2}	centi	c
10^{-3}	milli	m
10^{-6}	micro	μ
10^{-9}	nano	n
10^{-12}	pico	p
10^{-15}	femto	f
10^{-18}	atto	a

Sistema Inglês de Engenharia. Neste sistema, as unidades de força são definidas independentemente e, por isto, devemos tomar um cuidado especial quando utilizamos este sistema (principalmente quando operamos com a segunda lei de Newton). A unidade básica de massa deste sistema é a libra massa (lbm), a de força é a libra força (lbf), a de comprimento é o pé (ft), a de tempo é o segundo (s) e a de temperatura absoluta é o Rankine ($^{\circ}\text{R}$). Para que a equação da segunda lei de Newton seja homogênea, nós temos que escrevê-la do seguinte modo:

$$F = \frac{m a}{g_c} \quad (12)$$

Onde g_c é uma constante de proporcionalidade que nos permite definir tanto a força como a massa. Para o sistema inglês de engenharia, a força de 1 lbf é definida como aquela que atuando sobre a massa de 1 lbm provoca uma aceleração igual a da gravidade padrão ($32,174 \text{ ft s}^{-2}$).

São três as grandezas tomadas como referência (unidades fundamentais): **comprimento** (m), **força** (N ou J) e **tempo** (segundo). Todas as outras unidades são

derivadas destas. Assim, a unidade de volume é o m^3 , a unidade de **aceleração** é o m s^{-2} , a unidade de **trabalho** é o kg. m , e a unidade de **pressão** é o kg m^{-2} . Para um corpo em **queda livre** no vácuo a aceleração é a da gravidade: $9,81 \text{ m s}^{-2}$ e a única força atuante é o seu próprio peso.

Classificação dos fluidos.

Os fluidos podem ser classificados como **newtonianos** ou **não-newtonianos**. No fluido **newtoniano** existe uma **relação linear** entre o valor da **tensão de cisalhamento** aplicada e a **velocidade** de deformação resultante [μ , fator de proporcionalidade é constante na equação da força]. No fluido **não-newtoniano** existe uma relação **não linear** entre a **tensão de cisalhamento** aplicada e a **velocidade** de deformação angular. Um plástico **ideal** tem uma **tensão** de escoamento definida e uma relação linear constante de τ sobre du/dy . Uma substância **pseudoplástica**, como a tinta de impressão, tem uma **viscosidade** que depende da deformação angular anterior da substância e tem a tendência de endurecer quando em repouso. **Gases** e **líquidos finos** tendem a ser fluidos **newtonianos**, enquanto que, hidrocarbonetos de longas cadeias podem ser não-newtonianos.

PROPRIEDADES FÍSICAS DOS FLUIDOS

Massa Específica. A massa específica ρ de um fluido é definida como a massa por unidade de volume. A unidade é dada em g cm^{-3} , kg m^{-3} , etc. $\rho = m/V$

Peso Específico. O peso específico γ de uma substância é o seu peso por unidade de volume. Para líquidos, γ pode ser tomado como constante para mudanças normais de **pressão**. O peso específico da **água** para oscilações normais de temperatura é de 9810 N m^{-3} , o peso específico do **mercúrio**, $13600 \text{ kg m}^{-3} \times 9,81 \text{ m s}^{-2}$. O peso específico dos **gases** pode ser calculado usando-se a equação de estado de um **gás** $\gamma = P/V$ ou $p v/T = R$ (lei de Boyle e Charles).

Volume Específico. O volume específico v é o inverso da massa específica ρ , isto é, é o volume ocupado por unidade de massa. $v = 1/\rho$.

Relação entre **peso** específico e **volume** específico.

$$\gamma = \frac{P}{V} = \frac{m \cdot g}{V} = \rho \cdot g \quad (13)$$

Densidade de um corpo. A densidade relativa ou simplesmente densidade de um material, **S**, a relação entre a massa específica do material e a massa específica de um material como padrão. No caso do **líquido**, essa substância é a **água**; tratando-se de **gases**, geralmente se adota o **ar**. A densidade da **água** é 1 e do **mercúrio** é 13,6. A densidade de uma substância é a mesma em qualquer sistema de unidade.

$$S = \frac{\rho}{\rho_{\text{água}}} = \frac{\gamma}{\gamma_{\text{água}}} \quad (14)$$

A massa específica e o peso específico da água variam ligeiramente com a temperatura; as relações aproximadas são

$$\rho_{H_2O} = 1000 - \frac{(T - 4)^2}{180} \quad (15)$$

$$\gamma_{H_2O} = 9800 - \frac{(T - 4)^2}{18} \quad (16)$$

TABELA 4. Massas específicas, pesos específicos e densidades do ar e da água nas condições normais

	Massa específica ρ		Peso específico γ		densidade S
	kg/m^3	$slug/ft^3$	N/m^2	lb/ft^3	
Ar	1,23	0,0024	12,1	0,077	0,00123
Água	1000	1,94	9810	62,4	1

Para mercúrio, a gravidade específica é relacionada com a temperatura por

$$S_{Hg} = 13,6 - 0,0024T \quad (17)$$

A temperatura nas três equações acima é medida em graus Celsius. Para temperatura abaixo de 50 °C, usando os valores normais descritos anteriormente para água e mercúrio, o erro é menor do que 1%, certamente dentro dos limites de tolerância da engenharia para a maioria dos problemas de projeto. Note que a massa específica da água a 0 °C (32 °F) é menor do que a 4 °C; consequentemente a água mais leve a 0 °C sobe para a superfície de um lago onde o congelamento ocorre. Para a maioria dos outros líquidos, a massa específica no congelamento é maior que a massa específica logo acima do congelamento.

Exemplo 1. Sabendo-se que 800 gramas de um líquido enchem um cubo de 0,08 m de aresta, obter a massa específica desse fluido.

Solução.

$$m = 800 \text{ g}$$

$$V = (0,08)^3 = 0,000512 \text{ m}^3 = 512 \text{ cm}^3$$

$$\text{Donde } \rho = \frac{m}{V} = \frac{800}{512} = 1,562 \text{ g / cm}^3$$

Exemplo 2. Enche-se um frasco com 3,06 g de ácido sulfúrico. Repete-se a experiência, substituindo o ácido por 1,66 g de água. Obter a densidade relativa do ácido sulfúrico.

Solução.

$$S = \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{m_2 / V_2}{m_1 / V_1} \quad \text{como } V_1 = V_2 \quad S = \frac{m_2}{m_1} = \frac{3,06}{1,66} = 1,843$$

ESCALA DE PRESSÃO E TEMPERATURA

Esforços de Superfície

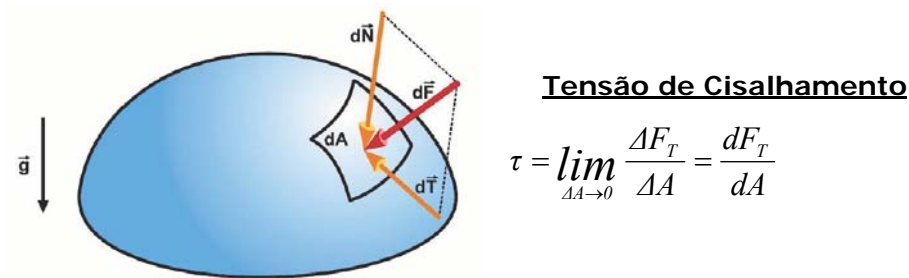


FIGURA 4 Distribuição de tensão normal e cisalhamento

Tensão Normal ou Pressão

$$P = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_N}{\Delta A} = \frac{dF_N}{dA}$$

Na mecânica dos fluidos a pressão resulta da força compressiva normal agindo sobre uma área. A pressão p é definida como

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_n}{\Delta A} \quad (18)$$

Na qual ΔF_n é a força normal compressiva incremental agindo sobre o incremento de área ΔA . A unidade métrica que deverá ser usada para a pressão é o Newton por metro quadrado (N m^{-2}) ou o pascal (Pa). Como o pascal é uma unidade muito pequena de pressão, é convencional expressar a pressão em quilopascal (kPa). Por exemplo, a pressão atmosférica padrão ao nível do mar é 101,3 kPa. As unidades inglesas para a pressão são a libra por polegada ao quadrado (psi) e a libra por pé quadrado (lb ft^{-2}).

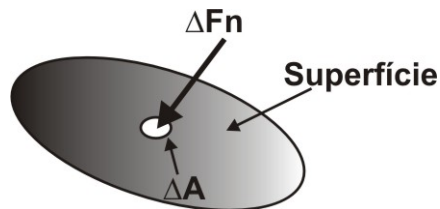


FIGURA 5 Definição de pressão

Tanto a pressão como a temperatura são quantidades físicas que podem ser medidas usando escalas diferentes. Existem escalas absolutas para pressão e temperatura e escalas que medem essas quantidades em relação a pontos de referência selecionados.

A **pressão absoluta** chega a zero quando um vácuo ideal é atingido, ou seja, quando não resta mais nenhuma molécula em determinado espaço; conseqüentemente, uma pressão absoluta negativa é impossível. Uma segunda escala é definida medindo pressões relativas à pressão atmosférica local. Essa pressão é chamada **pressão manométrica**. A conversão da pressão manométrica para a pressão absoluta pode ser feita usando:

$$P_{absoluta} = P_{atmosférica} + P_{manométrica} \quad (19)$$

A pressão atmosférica é a pressão atmosférica local, que pode mudar com o tempo e com a altitude.

A pressão manométrica é negativa sempre que a pressão absoluta for menor que a pressão atmosférica; pode, então, ser chamada de vácuo.

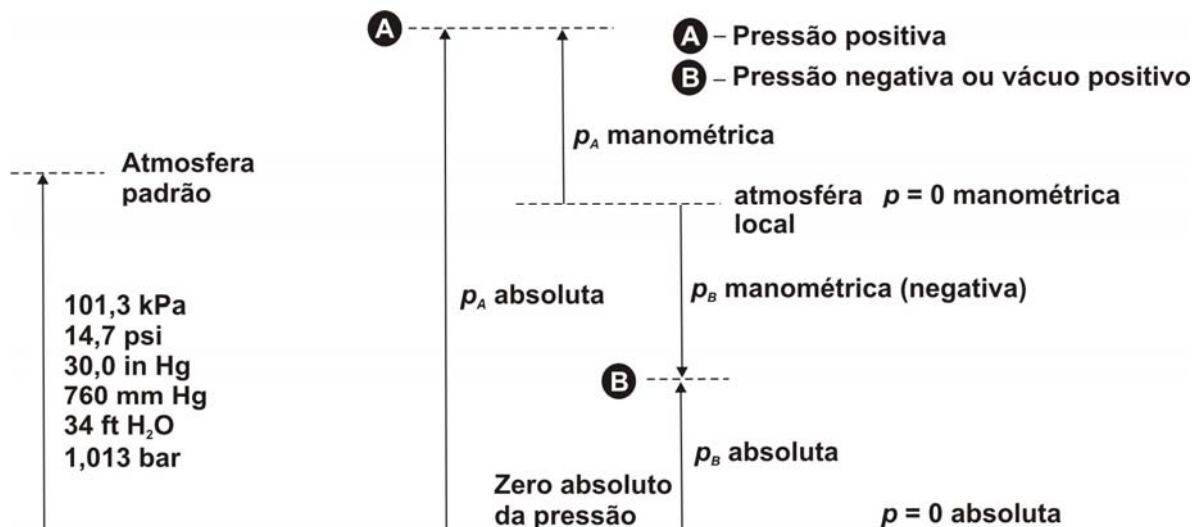


FIGURA - Pressão manométrica e pressão absoluta

FIGURA 6 Pressão manométrica e pressão absoluta

	°C	K	°F	°R
Ponto de vaporização	100°	373	212°	672°
Ponto de congelamento	0°	273	32°	492°
	-18°	255	0°	460°
Zero absoluto de temperatura				

FIGURA 7 Escalas de temperatura

Duas escalas de temperatura são geralmente usadas, a Celsius (C) e a Fahrenheit (F). Ambas são baseadas no ponto de fusão e no ponto de evaporação da água na pressão atmosférica de 101,3 kPa (14,7 psi). Existem duas escalas de temperatura absolutas correspondentes. A escala absoluta correspondente à escala Celsius é a escala kelvin (K). A relação entre essas escalas é

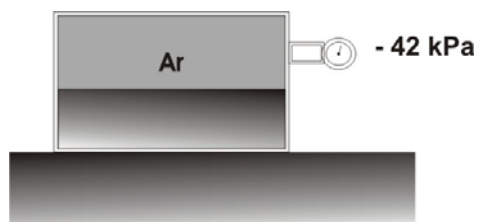
$$K = ^\circ C + 273,15 \quad (20)$$

A escala absoluta correspondente à escala Fahrenheit é a escala Rankine (°R). A relação entre essas escalas é

$$^\circ R = ^\circ F + 459,67 \quad (21)$$

Exemplo. Um medidor de pressão, colocado em um tanque rígido, mede um vácuo de 42 kPa dentro do tanque mostrada ao lado, que está situado num local em Colorado, onde a altitude é de 2000 m. Determine a pressão absoluta dentro do tanque.

Solução. Para determinar a pressão absoluta, a pressão atmosférica deve ser conhecida. Se a altitude não fosse dada, assumiríamos a pressão atmosférica padrão 101,3 kPa. Porém, com a altitude do local



dada, a pressão atmosférica é encontrada na tabela B.3 no Apêndice B (Mecânica dos Fluidos, p637. Merle C. Potter & David C. Wiggert) como sendo 79,5 kPa. Assim

$$p = -42 + 79,5 = 37,5 \text{ kPa absolutos}$$

Observação. Um vácuo é sempre uma pressão manométrica negativa.

VISCOSIDADE

A viscosidade pode ser imaginada como sendo a “aderência” interna de um fluido. É uma das propriedades que influencia a potência necessária para mover um aerofólio através da atmosfera. Ela é responsável pelas perdas de energia associadas ao transporte de fluidos em dutos, canais e tubulações. Além disso a viscosidade tem um papel primário na geração de turbulência. Nem seria necessário dizer que a viscosidade é uma propriedade extremamente importante a ser considerada em nossos estudos de escoamento de fluidos.

A taxa de deformação de um fluido é diretamente ligada à viscosidade do fluido. Para uma determinada tensão, um fluido altamente viscoso deforma-se numa taxa menor do que um fluido com baixa viscosidade. Considere o escoamento da Fig. 8, no qual as partículas do fluido se movem na direção x com velocidades diferentes, de tal forma que as velocidades das partículas, u , varia com a coordenada y . Duas posições das partículas são mostradas em tempos diferentes; observe como as partículas se movem relativamente uma a outra. Para tal campo de escoamento simples, no qual $u = u(y)$, podemos definir a viscosidade μ do fluido pela relação

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

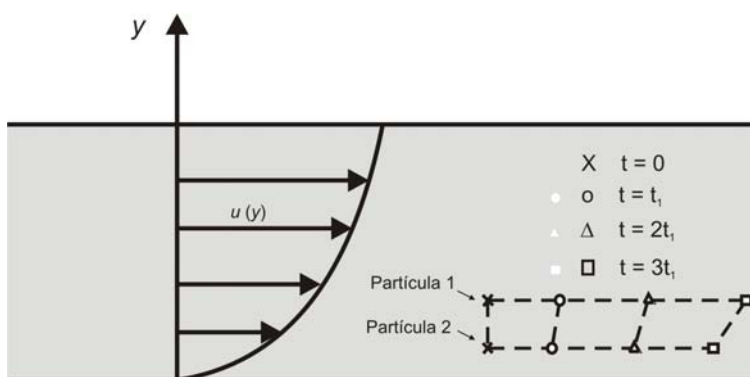


Figura 8. Movimento relativo de duas partículas do fluido na presença de tensões de cisalhamento

Na qual τ é a tensão de cisalhamento e u é a velocidade na direção x . As unidades de τ são N/m^2 ou Pa e para μ são N s/m^2 . A quantidade du/dy é o gradiente de velocidade, e pode ser interpretada como uma taxa de deformação.

A massa específica e o peso específico são propriedades que indicam o “peso” de um fluido. É claro, que estas propriedades não são suficientes para caracterizar o

comportamento dos fluidos porque dois fluidos (como água e o óleo) podem apresentar massas específicas aproximadamente iguais, mas se comportar muito distintamente quando escoam. Assim torna-se aparente que é necessário alguma propriedade adicional para descrever a “fluidez” das substâncias.

Definimos um fluido como sendo uma substância que se deforma continuamente sob a ação de uma tensão de cisalhamento.

A viscosidade de um fluido é propriedade que determina o grau de sua resistência à força cisalhante. A viscosidade pode ser imaginada como sendo a “aderência” interna de um fluido.

Resistência à deformação dos fluidos em movimento: não se manifesta se o fluido se encontrar em repouso. A ação da viscosidade representa uma forma de atrito interno, exercendo-se entre partículas adjacentes que se deslocam com velocidades diferentes. A viscosidade é uma propriedade termodinâmica (depende de T e P).

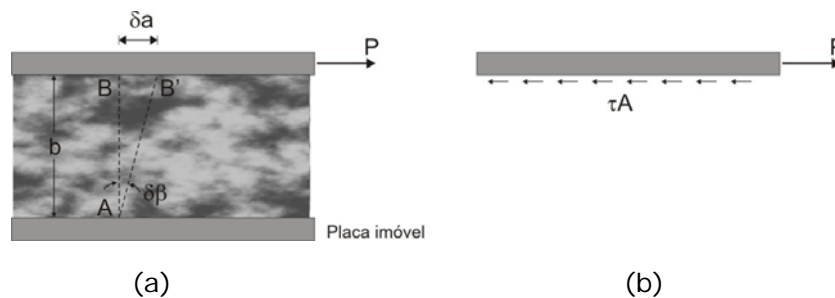


FIGURA 9. Deformação do material colocado entre duas placas paralelas. (a) Forças que atuam na placa superior

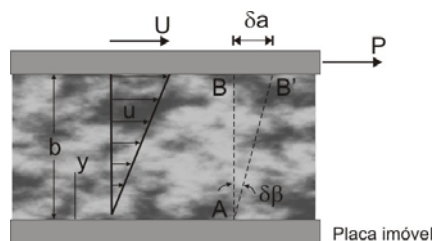


FIGURA 10. Comportamento de um fluido localizado entre duas placas paralelas

Num pequeno intervalo de tempo, δt , uma linha vertical AB no fluido rotaciona de um ângulo $\delta \beta$, Assim,

$$\tan \delta\beta \approx \delta\beta = \frac{\delta a}{b} \quad (22)$$

Como $\delta a = U \delta t$, segue que

$$\delta\beta = \frac{U \delta t}{b} \quad (23)$$

Neste caso, $\delta\beta$ não depende apenas da força P (que determina U), mas também do tempo. Assim, não é razoável tentar relacionar a tensão de cisalhamento, τ , com $\delta\beta$ (como fizemos para o sólido). Em vez disso, nós vamos relacionar a tensão de cisalhamento com a taxa de variação de $\delta\beta$ com o tempo. A taxa de deformação por cisalhamento, γ , é definida por

$$\gamma = \lim_{\delta t \rightarrow 0} \frac{\delta\beta}{\delta t} \quad (24)$$

que, neste caso (o do escoamento entre duas placas paralelas), é igual a

$$\gamma = \frac{U}{b} = \frac{du}{dy} \quad (25)$$

Variando as condições do experimento, obteremos que a tensão de cisalhamento aumenta se aumentarmos o valor de P ($\tau = P/A$) e que a taxa de deformação por cisalhamento, γ , aumenta proporcionalmente, ou seja,

$$\tau \propto \gamma \quad \text{ou} \quad \tau \propto \frac{du}{dy} \quad (26)$$

Para fluidos comuns (como a água, óleo, gasolina e ar) a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação por cisalhamento (gradiente de velocidade) podem ser relacionadas pela equação seguinte

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (27)$$

onde a constante de proporcionalidade, μ , é denominada **viscosidade dinâmica** do fluido

$\mu \rightarrow$ Viscosidade dinâmica ou absoluta [N.s m^{-2}] S.I.

Freqüentemente a viscosidade absoluta é expressa em centipoise em homenagem a Poiseuille.

$$\mu = \frac{1,78}{1 + 0,0337\theta + 0,000221\theta^2} \quad (28)$$

onde θ é temperatura em graus Celsius.

Viscosidade Cinemática

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \left[\text{m}^2 \text{s}^{-1} \right] \quad (29)$$

Os gráficos de τ em função de du/dy devem ser retas com inclinação igual a viscosidade dinâmica.

O valor da viscosidade dinâmica varia de fluido para fluido, e para um fluido em particular, esta viscosidade depende muito da temperatura.

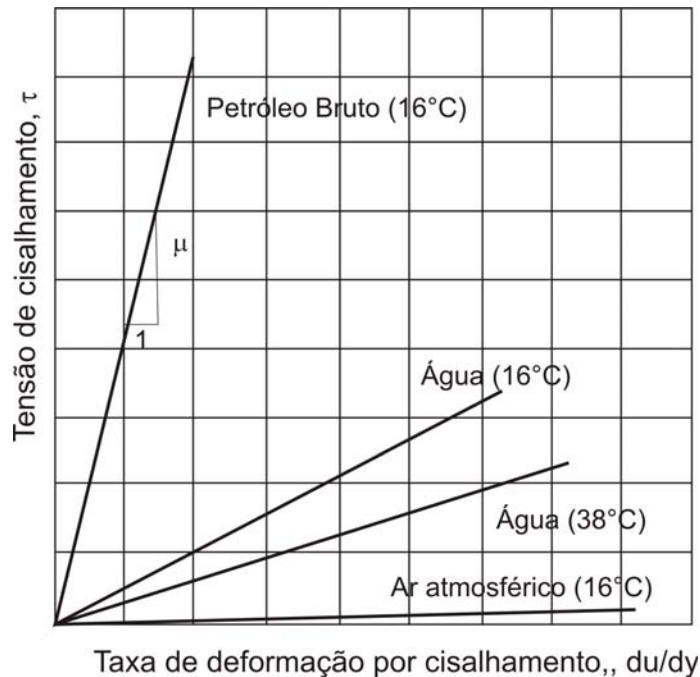


FIGURA 11 Variação da tensão de cisalhamento com a taxa de deformação

Variação da Viscosidade Absoluta com a Temperatura

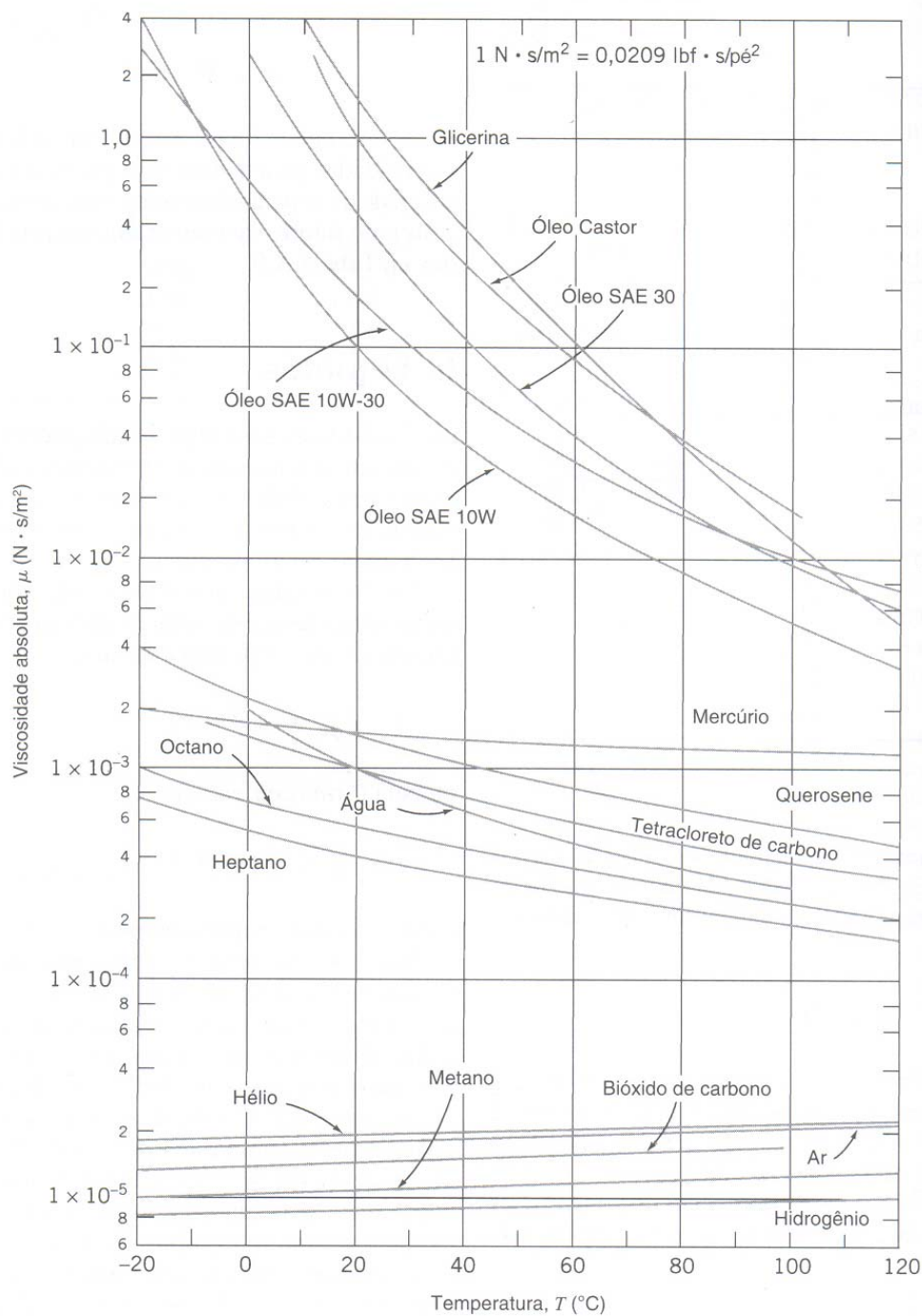


FIGURA 12 Variação da viscosidade com a temperatura

Líquido: A viscosidade diminui com o aumento da temperatura.

A viscosidade é muito dependente da temperatura nos líquidos nos quais as forças coesivas têm papel dominante; observe que a viscosidade dos líquidos decresce com o aumento da temperatura.

$$\mu = A e^{B/t} \quad (30)$$

Conhecida como equação de Andrade; as constantes A e B seriam determinadas por meio de dados medidos.

Gás: A viscosidade aumenta com o aumento da temperatura.

Se a tensão de cisalhamento do fluido é diretamente proporcional ao gradiente de velocidade, como assumimos na equação 2, o fluido é conhecido como um **fluido newtoniano**. Muitos fluidos comuns, tais como o ar, a água e o óleo, são newtonianos. Os fluidos *não-newtonianos*, com relações de tensão de cisalhamento *versus* a taxa de esforço como mostradas na Fig. 1.8, muitas vezes têm uma composição molecular complexa.

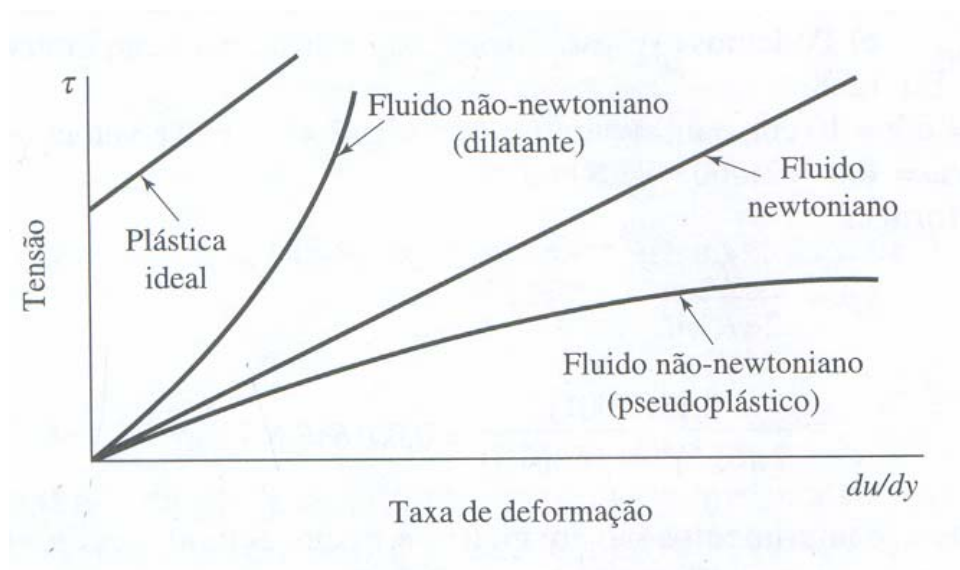


FIGURA 13 Fluidos newtonianos e não-newtonianos

Diferença entre fluido Ideal, fluido Newtoniano e fluido não Newtoniano

Fluido Ideal: Fluido que não possui viscosidade.

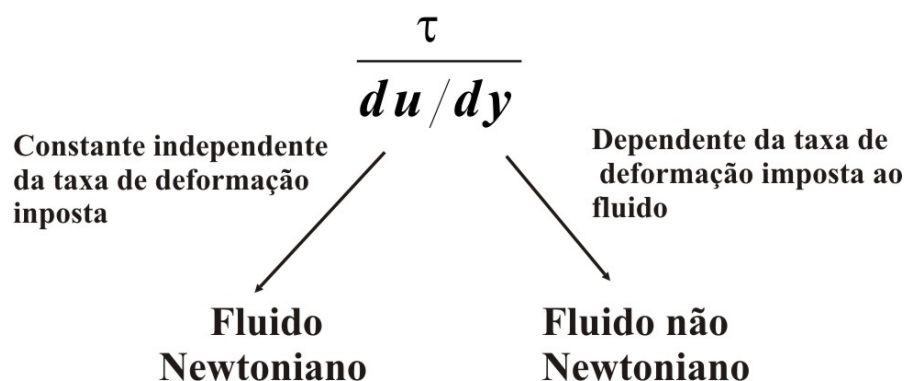
Fluido Newtoniano: Fluido que se comporta segundo o modelo proposto por Isaac Newton

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (31)$$

Fluido não-Newtoniano: Fluido que se comporta de maneira diversa do modelo por Newton.

Comportamento dos fluidos viscosos

Parâmetros de Análise:



ELASTICIDADE

Sob a ação de uma força F , seja V o volume de um fluido, à pressão unitária P . Dando a força F o acréscimo dF , a pressão aumentará de dP e o volume diminuirá dV . A variação relativa de volume é dV/V .

$$\text{Módulo de elasticidade} = E = -\frac{dP}{dV/V} \quad E = \frac{dP}{dV/V} \quad (32)$$

Nas transformações **isotérmicas** tem-se

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad \text{e} \quad E = P \quad \text{Sendo } P \text{ a pressão final } (P_2). \quad (33)$$

Nas transformações **adiabáticas**, tem-se:

$$P_1 V_1^k = P_2 V_2^k \quad \text{e} \quad E = k P \quad k \text{ constante adiabática e } P \text{ a pressão final } (P_2). \quad (34)$$

COMPRESSIBILIDADE

É o inverso da elasticidade

$$C = \frac{1}{E} \quad \Rightarrow \quad C = \frac{dV/V}{dP} = \frac{d\rho/\rho}{dP} \quad (35)$$

Exemplos. Devido ao acréscimo de pressão $dP = 200 \text{ Pa}$, um fluido apresenta diminuição de 2,5% do seu volume inicial. Achar o módulo de elasticidade desse fluido.

$$\frac{dV}{V} = 2,5\% = 0,025 \quad \Rightarrow \quad E = \frac{dP}{dV/V} = \frac{200}{0,025} = 8\,000 \text{ N/m}^2.$$

PRESSÃO DE VAPOR

É a pressão parcial da fase de vapor em equilíbrio com a fase líquida de uma substância a uma determinada temperatura.

Um líquido entra em ebulição quando a pressão local for igual à sua pressão de vapor àquela temperatura. Portanto, existem duas maneiras para provocar ebulição em um líquido:

1. Aumentar sua temperatura
2. Diminuir a pressão local (cavitação).

Pressão de vapor

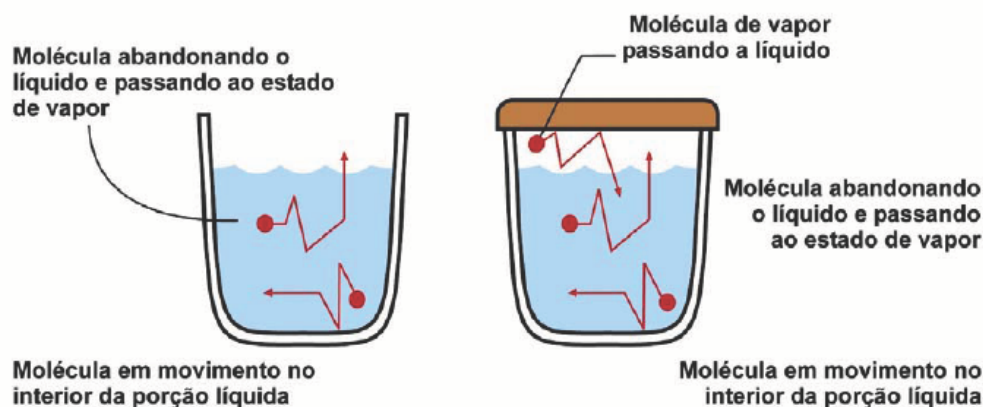


FIGURA 14 Distribuição da pressão de vapor

O fenômeno da cavitação ocorre em instalações hidráulicas quando bolhas de vapor se formam em regiões de baixa pressão e implodem em superfícies sólidas ao encontrarem campo de pressão positiva.

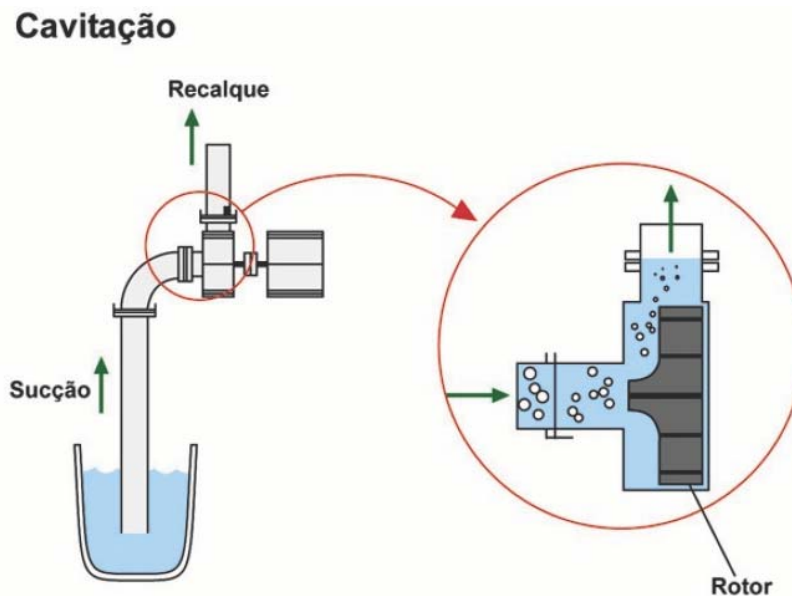


FIGURA 15 Cavitação

TENSÃO SUPERFICIAL

É a **tensão de tração interfacial** aparente agindo num líquido. É uma propriedade que resulta de forças atrativas entre moléculas. Manifesta-se apenas em líquidos, na sua **interface**.

A tensão superficial tem unidades de força por unidade de comprimento, N/m (lb/ft).

A força devida à tensão superficial resulta do comprimento multiplicado pela tensão superficial; o comprimento a ser usado é o comprimento do fluido em contato com o sólido, ou a circunferência, no caso de uma bolha. O efeito da tensão superficial pode ser ilustrado analisando os diagramas de corpo livre da metade de uma gotícula e metade de uma bolha como mostrado abaixo. A gotícula tem uma superfície e a bolha é composta de um filme fino de líquido com uma superfície interna e uma superfície externa. As pressões dentro da gotícula e da gota podem, agora ser calculadas.

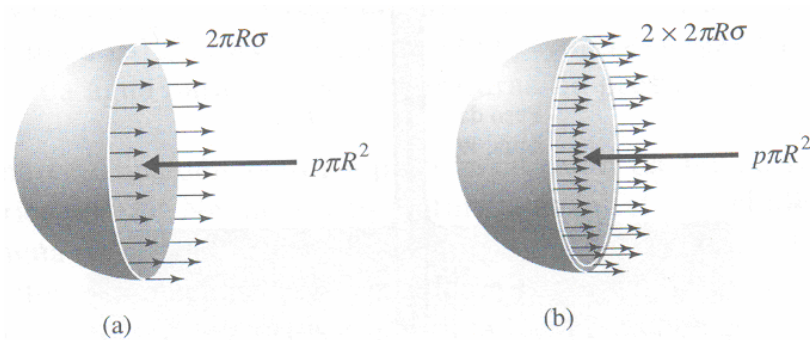


FIGURA 16. Forças internas em (a) uma gotícula e (b) uma bolha

A força da pressão, $p\pi R^2$, na gotícula, equilibra a força de tensão superficial em volta da circunferência. Então

$$p\pi R^2 = 2\pi R\sigma \quad (36)$$

$$\therefore p = \frac{2\sigma}{R} \quad (37)$$

Similarmente, a força de pressão na bolha é equilibrada pelas forças da tensão superficial nas duas circunferências. Assim,

$$p\pi R^2 = 2 \times (2\pi R\sigma) \quad (38)$$

$$\therefore p = \frac{4\sigma}{R} \quad (39)$$

A Figura abaixo mostra a elevação de um líquido em um tubo capilar de vidro limpo devido a tensão superficial. O líquido faz um ângulo de contato β com o tubo de vidro. Experiências têm mostrado que este ângulo, tanto para água como para a maioria dos líquidos, em um tubo de vidro limpo, é zero.

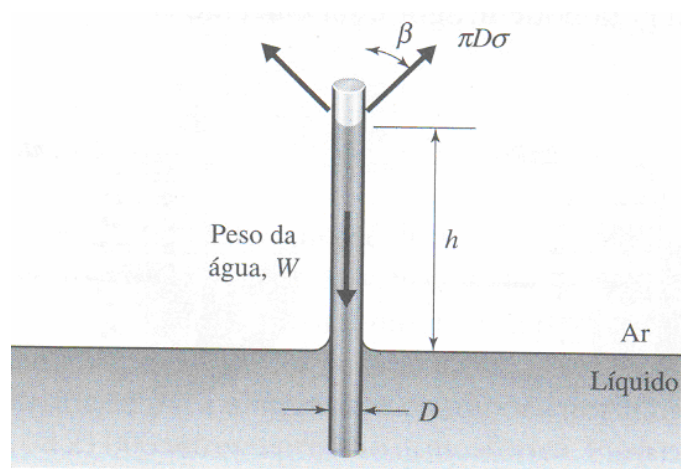


FIGURA 17 Elevação de um tubo capilar

$$\sigma \pi D \cos \beta = \gamma \frac{\pi D^2}{4} h \quad (40)$$

$$\therefore h = \frac{4\sigma \cos \beta}{\gamma D} \quad (41)$$

TABELA 1.3 Fatores de Conversão dos Sistemas Britânicos Unidades para o SI^a

	Converter de	Para	Multiplique por
Aceleração	ft / s ²	m / s ²	3,48 E-1
Área	ft ²	m ²	9,290 E-2
Comprimento	ft	m	3,048 E-1
	in	m	2,540 E-2
	milha	m	1,609 E+3
Energia	Btu	J	1,055 E+3
	ft . lb	J	1,356
Força	lbf	N	4,448
Massa	lbm	kg	4,536 E-1
	slug	kg	1,459 E+1
Massa específica	lbm / ft ³	kg / m ³	1,602 E+1
	slug / ft ³	kg / m ³	5,154 E+2
Peso específico	lbf / ft ³	N / m ³	1,571 E+2
Potência	ft . lbf / s	W	1,356
	hp	W	7,457 E+2
Pressão	in . Hg (60 °F)	N / m ²	3,377 E+3
	lbf / ft ² (psf)	N / m ²	4,788 E+1
	lbf / in ² (psi)	N / m ²	6,895 E+3
Temperatura	°F	°C	T _C = 5/9(T _F - 32)
	°R	K	5,556 E-1
Vazão em volume	ft ³ / s	m ³ / s	2,832 E-2
	galão / min	m ³ / s	6,309 E-5
Velocidade	ft / s	m / s	3,048 E-1
	milha / hora	m / s	4,470 E-1
Viscosidade cinemática	ft ² / s	m ² / s	9,290 E-2
Viscosidade dinâmica	lbf . s / ft ²	N . s / m ²	4,788 E+1

^a O Apen. A contém uma tabela de conversão de unidades mais precisa.

TABELA 1.4 Fatores de Conversão do SI para os Sistemas Britânicos de Unidades

	Converter de	Para	Multiplique por
Aceleração	m / s ²	ft / s ²	3,281
Área	m ²	ft ²	1,076 E+1
Comprimento	m	ft	3,281
	m	in	3,937 E+1
	m	milha	6,214 E-4
Energia	J	Btu	9,478 E-4
	J	ft . lb	7,376 E-1
Força	N	lbf	2,248 E-1
Massa	kg	lbm	2,205
	kg	slug	6,852 E-2
Massa específica	kg / m ³	lbm / ft ³	6,243 E-2
	kg / m ³	slug / ft ³	1,940 E-3
Peso específico	N / m ³	lbf / ft ³	6,366 E-3
Potência	W	ft . lbf / s	7,376 E-1
	W	Hp	1,341 E-3
Pressão	N / m ²	in . Hg (60 °F)	2,961 E-4
	N / m ²	lbf / ft ² (psf)	2,089 E-2
	N / m ²	lbf / in ² (psi)	1,450 E-4
Temperatura	°C	°F	T _F = 1,8T _C + 32
	K	R	1,800
Vazão em volume	m ³ / s	ft ³ / s	3,531 E+1
	m ³ / s	galão / min	1,585 E+4
Velocidade	m / s	ft / s	3,281
	m / s	milha / hora	2,237
Viscosidade cinemática	m ² / s	ft ² / s	1,076 E+1
Viscosidade dinâmica	N . s / m ²	lbf . s / ft ²	2,089 E-2

^a O Apen. A contém uma tabela de conversão de unidades mais precisa.