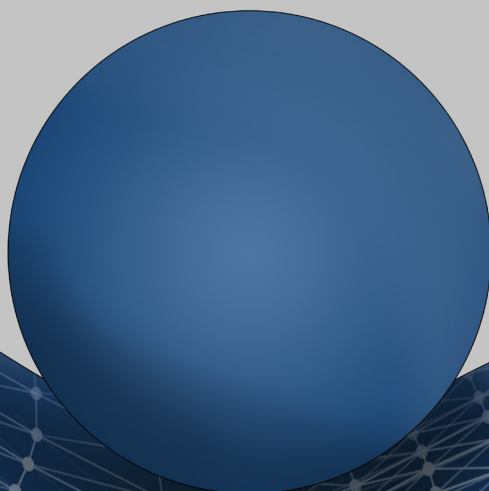




Tensão, tensão superficial e capilaridade:

Conceitos e definições

MÁRIO SOUZA



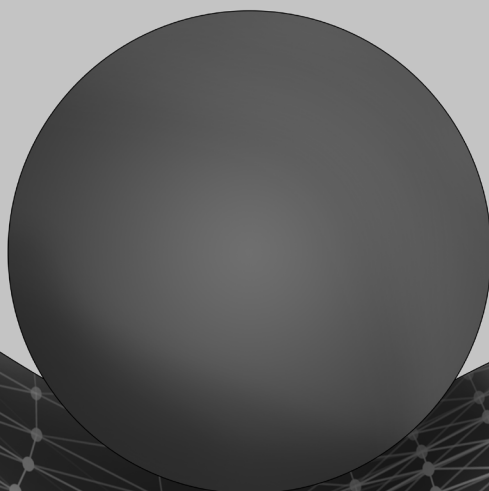
 **Atena**
Editora
Ano 2023



Tensão, tensão superficial e capilaridade:

Conceitos e definições

MÁRIO SOUZA



 **Atena**
Editora
Ano 2023

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Camila Alves de Cremona

Ellen Andressa Kubisty

Luiza Alves Batista

Nataly Evilin Gayde

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2023 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2023 Os autores

Copyright da edição © 2023 Atena

Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena

Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo do texto e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva do autor, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos ao autor, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná

Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia

Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará

Profª Drª Glécilla Colombelli de Souza Nunes – Universidade Estadual de Maringá

Profª Drª Iara Margolis Ribeiro – Universidade Federal de Pernambuco

Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense

Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande

Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá

Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora

Profª Drª Maria José de Holanda Leite – Universidade Federal de Alagoas

Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Prof. Dr. Milson dos Santos Barbosa – Universidade Tiradentes

Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte

Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Nilzo Ivo Ladwig – Universidade do Extremo Sul Catarinense

Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas

Profª Dr Ramiro Picoli Nippes – Universidade Estadual de Maringá

Profª Drª Regina Célia da Silva Barros Allil – Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí

Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Tensão, tensão superficial e capilaridade: conceitos e definições

Diagramação: Natália Sandrini de Azevedo
Correção: Flávia Roberta Barão
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: O autor
Autor: Mario de Souza

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)	
S729	<p>Souza, Mario de Tensão, tensão superficial e capilaridade: conceitos e definições / Mario de Souza. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2023.</p> <p>Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-65-258-1632-6 DOI: https://doi.org/10.22533/at.ed.326233107</p> <p>1. Física - Tensão. I. Souza, Mario de. II. Título. CDD 531.6</p>
Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166	

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná – Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

DECLARAÇÃO DO AUTOR

O autor desta obra: 1. Atesta não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao conteúdo publicado; 2. Declara que participou ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certifica que o texto publicado está completamente isento de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirma a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhece ter informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autoriza a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.

INTRODUÇÃO	1
SIGNIFICADO DE TENSÃO.....	2
Exercício:	2
O SIGNIFICADO FÍSICO DE TENSÃO A PARTIR DE HOOKE.....	3
Compreendendo a pressão e a densidade.....	10
De volta a compreensão de tensão.....	13
ASSOCIAÇÃO DE MOLAS	18
Em série	18
Em paralelo	19
EQUILÍBRIO ESTÁTICO	22
Mostrando a condição da soma das acelerações angulares externas nulas.....	23
TENSÃO SUPERFICIAL.....	29
A compreensão de interface na tensão superficial.....	32
Os três estados da matéria na visão clássica da física	35
elementos físicos e matemáticos da tensão superficial.....	35
Para descontrair	51
CAPILARIDADE.....	52
O ângulo de contato.....	56
A determinação da altura capilar	57
Tensoativos ou surfactantes: a física nas interações moleculares.....	59
Para descontrair	61
APÊNDICES.....	62
APÊNDICE – A.....	62
Pontos que podem ser tratados no conteúdo tensão	68
Pontos que podem ser tratados no conteúdo tensão superficial	69
Pontos que podem ser tratados no conteúdo capilaridade	70
APÊNDICE – B	78

REFERÊNCIAS	95
SOBRE O AUTOR	97

INTRODUÇÃO

Ao se estudar fluido, compreende-se que o mesmo se caracteriza, pois, de dois outros objetos da física, numa divisão pedagógica, que é a hidrostática e a hidrodinâmica. A hidrostática compreende ser a *mecânica de fluidos* que se preocupa com o estado de equilíbrio estático de líquidos e gases, ou seja, os fluidos em repouso, quando submetidos a ação da gravidade. Enquanto que a hidrodinâmica é a parte da *mecânica de fluidos* que se preocupa com a descrição de fluxos de líquidos e gases, ou seja, os fluidos em movimento. E, dentro da hidrostática tem-se a divisão de ação baseada na concepção de forças de curto alcance (tensão superficial e capilaridade) e a de longo alcance (densidade e pressão) e, nesse desenho, a escrita aqui será sobre tensão superficial e capilaridade, ou seja, sobre as forças de curto alcance, no contexto da hidrostática.

Esse trabalho é uma ampliação de dissertação de mestrado do autor, e tem raízes no tema, ao vê-lo num livro de física¹, quando no primeiro semestre de física, na Universidade Federal de Pernambuco, onde estudava a disciplina Física Básica Experimental I, pelo método Keller, sob a supervisão do Professor Luiz de Oliveira e, por ser ele um professor que se permitia ir até ele, diferentemente de outros do Departamento de Física, na época, eu me aproximei dele para saber sobre tensão superficial que *não* tinha visto no Ensino Médio (antes chamado de 2º grau) e ele me disse que não ia ver isso aqui (referindo-se ao programa daquela disciplina, naquele período), mas talvez no curso de física mais adiante. Mas não vi. E essa estranheza me fez traduzir numa curiosidade sobre o tema que fui conhece-lo de forma pessoal e, tal fato me levou a trabalhar o referido contexto no mestrado em ensino de física, pelo programa da Sociedade Brasileira de Física (SBF) do Mestrado Nacional Profissional de Ensino em Física (MNPEF), com orientação do professor doutor Alberto Einstein Pereira de Araújo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Garanhuns e desse modo dar contributo desse tema para o Ensino Médio.

1. SEARES, Zemansky. **Mecânica**, vol. I.

SIGNIFICADO DE TENSÃO

A palavra tensão nos remete a vários significados, por exemplo, a tensão elétrica ou a tensão sanguínea, que nos fornece modelos mentais de compreensão de tensão e nos remete ao significado de “algo forçado” que acontece, num determinado tempo por ação de *forças* localizadas, de modo a dificultar ação contrária, como exprime a *força eletromotriz* produzida nos circuitos elétricos indicando haver uma diferença de potencial, de modo a proporcionar o movimento dos elétrons. Enquanto que o significado de tensão sanguínea vai ser compreendido como pressão do sangue nos vasos sanguíneos devido a circulação do sangue por dutos de condição sanguínea corpóreos (veias, artérias e capilares) e, nesse momento outro referente físico similar ao conceito de tensão, conhecido como pressão arterial, ou seja, o termo tensão pode ser compreendido na sua forma geral como sendo algo posto na condição de estresse ou daquilo que é tenso. Nesse sentido, essa dificuldade semântica deve ser sanada com a especificidade do objeto físico em pauta para o estudo de tensão que não é uma força, mas toma (adquire) esse significado conceitual.

EXERCÍCIO:

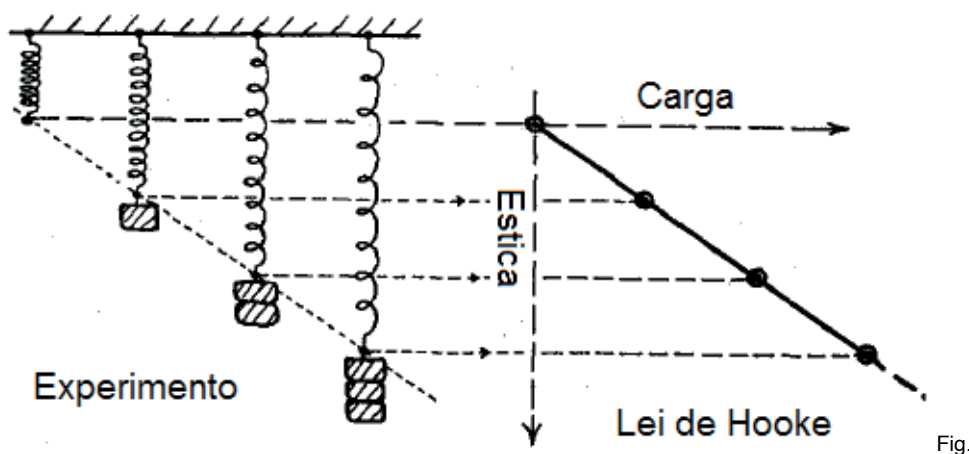
Procure na internet o significado de:

- a. tensão de ruptura;
- b. tensão nervosa;
- c. tensão de passo;
- d. tensão de contato;
- e. tensão de toque.

O SIGNIFICADO FÍSICO DE TENSÃO A PARTIR DE HOOKE

Esta compreensão surge dos trabalhos de Robert Hooke¹ (1635–1703), cientista inglês, que diante de várias observações experimentais afirma que “*de acordo com a tensão será a força*”² (observe a linguagem física empregada, para compreender que a tensão não é uma força, ela responde à sua natureza tensional, de acordo com a força ou interação aplicada ou ocorrida). Nesse sentido observe esses experimentos “simples”³, tais como:

a. uma mola sob tensão axial (relativo ao eixo central da mola)



1.1. Uma mola distendida.

ROGERES, Physics for the Inquiring Mind, p. 78

Observe com isso que, a medida que o sistema sofre uma carga, a mola é distendida de uma quantidade x e, ao mesmo tempo, o sistema é tensionado mais e mais, a medida que o sistema é carregado, como o peso 1, ou P_1 , depois com P_2 e finalmente P_3 .

Lembrando que, ao contrário, se essas cargas forem sendo retiradas passo a passo, o sistema vai encolhendo, ou seja, vai diminuindo a tensão sobre a mola, até a última carga ser retirada e a mola voltar ao seu estado inicial. Há uma restauração da mola. Daí o sistema físico, por vezes, ser denominado de “força elástica”.

Assim, se a mola tem um comprimento inicial x_0 e, na primeira carga vai para um comprimento x_1 , na segunda carga para um comprimento x_2 , e para a terceira carga para

1. Daí o uso da linguagem física, LEI DE HOOKE, para expressar a compreensão da força elástica, ou tensão.

2. Grifo meu

3. Na realidade não existe experimento simples, isso é só uma fala comparativa com o uso de muitos instrumentos de medidas e outros apetrechos de uso experimentais, que nesse caso não foi usado. Mas o modo de pensar um experimento e realiza-lo não é nada simples, pois, em si mesmo, é um ato criativo da mente humana

um comprimento x_3 , logo, ao contrário, esse comprimento vai diminuindo até voltar a x_0 , de modo a destacar que houve restauração do comprimento da mola, para se naturalizar como “força elástica”. Outro fato interessante é que, no início, sem carga, a tensão é nula. A tensão na mola vai acontecendo, a medida que a mola vai sendo carregada, à medida que a força peso vai se justificando como carga na mola. Observe ainda que, quanto maior for a carga maior será o deslocamento da mola, isso significa que a tensão nesse caso, ou seja, a força elástica aplicada a mola é proporcional ao deslocamento o que revela existir uma constante dada pela razão entre essa força elástica (tensão) e o deslocamento. Isso fornece uma linguagem vetorial da caracterização do objeto físico em pauta.

- b. uma barra sobre torção, numa escala angular

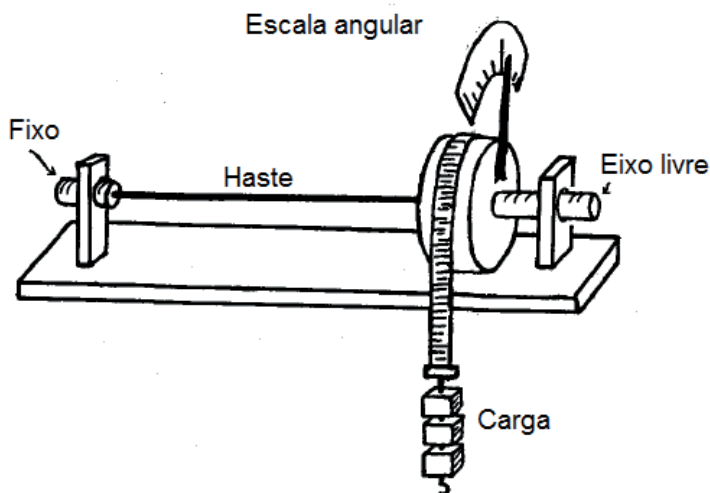


Fig. 1.2. Uma barra sendo torcida.

ROGERES, Physics for the Inquiring Mind, p. 79

- c. uma viga de madeira ancorada numa extremidade e carregada na outra

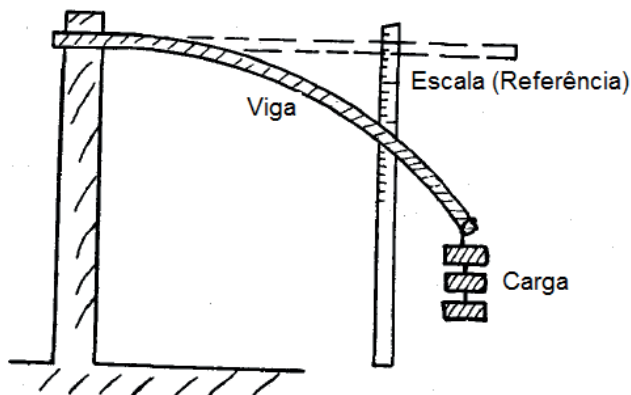


Fig. 1.3 Viga de madeira sobre carregada numa extremidade

ROGERES, Physics for the Inquiring Mind, p. 79

- d. uma carga central apoiada numa viga

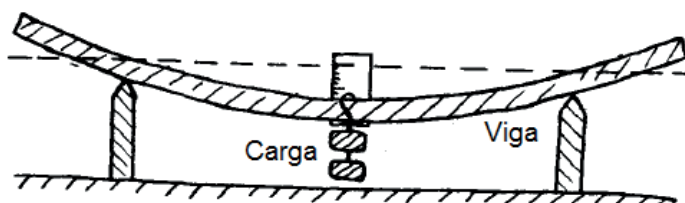


Fig. 1.4 Carga apoiada no centro de uma viga

ROGERES, Physics for the Inquiring Mind, p. 79

Esses exemplos justificam a necessidade de compreender e estudar o significado de tensão dentro da física, agora, sendo posta numa linguagem mais específica.

Uma vez que esses experimentos conduziram Robert Hooke anunciar em 1676 a primeira compreensão de tensão: ***para qualquer corpo a força de restauração é proporcional ao deslocamento***. Aqui a questão física da compreensão de **Tensão** enquanto **Força de Restauração** ou **Força Elástica** devido à possibilidade da elasticidade de materiais sólidos, conforme já fora especificado.

Haja visto que a tensão é uma resposta a uma interação (carga). Isto quer dizer que, sem carga necessária para iniciar a deformação, em princípio, o material (mola ou viga) fica no seu estado inicial ou extremamente próximo dele mas, diante da deformação, mesmo

que pequeníssima, com a aplicação da carga o material, após a retirada da referida carga que o tencionou volta ao estado inicial como se fosse um elástico. Esse é o limite da Lei de Hooke, ou seja, quando a tensão ocorre, mas, não ocorre a deformação permanente.

Assim, pode-se compreender a Lei de Hooke a qual explicita a compreensão física da *deformação estando presente enquanto tensão*, quando há aplicação da carga (força). Onde essa deformação é restaurada, após a descarga no processo.

Isto faz ver que a essência da Física na Lei de Hooke está na concepção de que:

tensão e força de deformação.

Ou seja, há elasticidade do material. Logo, uma haste de metal, sobre estresse, sofre um processo de distensão (deformação), tal como um processo de elasticidade, conforme figura 1.5.

Uma análise Física da figura 1.5 é a de que há linearidade, num primeiro momento, em que a tensão é aplicada, até a posição chamada de limite da Lei de Hooke. Isto faz compreender que a *Lei de Hooke tem validade apenas para pequenas deformações*, ou seja, enquanto tensões não ultrapassem o valor de corte ou limite da Lei de Hooke.

Daí a compreensão da *tensão máxima*, representada por, (σ), ser denominada de *Limite de Proporcionalidade do fenômeno da elasticidade*. Ou seja, ocorre a elasticidade, mas, a deformação pronunciada volta ao lugar quando não há a aplicação da carga. Observe analiticamente a figura 1.5.

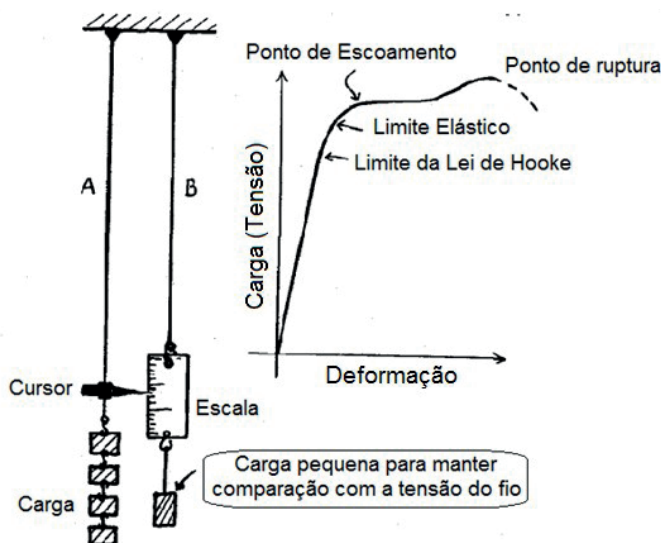


Fig. 1.5 Uma haste sobre tensão

Observe a construção física do conceito de tensão que se pronuncia na Lei de Hooke para pequenas deformações, ou seja, são “forças” (tensões) de curto alcance. E, tal conceito vai se tornar presente dentro da concepção de tensão superficial em líquidos.

Em seguida, ainda na figura 1.5, há na curva a característica quase linear, que começa no Ponto de Escoamento, ou seja, é uma região chamada de Fluidez do Material. Isso quer dizer que, se a carga externa for aplicada e ultrapassar o Limite Elástico, quando esta carga for retirada, embora a haste (ou outro material) fique um pouco mais curta, não retorna a dimensão inicial, mantendo-se deformada. Essa análise é muito importante no uso de materiais que irão suportar pesos sobre ele, de modo a se verificar onde ocorre esse ponto de ruptura e estabelecer limites de pesos para sobre carregar o referido material.

Continuando o aumento de carga a haste vai atingir o estado físico de Fluidez do Material. Quando o Limite de Fluidez é atingido a curva continua subindo e atinge um ponto máximo e cai bruscamente e desintegra-se atingindo o Ponto de Ruptura, ou seja, a haste dilata-se sem que haja acréscimo de carga, esse é o Limite de *Resistência do Material*, que é outra dimensão de estudos na física e engenharia.

Faz-se saber que esses pontos específicos de interesse físico dependem do material da amostra e do tratamento ao qual esta amostra está submetida (tensionada).

De modo geral, a Lei de Hooke está na concepção de que:

$$\frac{\text{Estresse (devido a força aplicada)}}{\text{Tensão [(extensão)devido a deformação]} } = \text{valor em módulo}$$

Essa é a concepção Física da Lei de Hooke e, essa compreensão é aplicada a todos os materiais e a qualquer tipo de distorção.

$$\frac{\text{Força/Área}}{\text{Variação do comprimento/Comprimento original}} = \text{constante}$$

Onde $\varepsilon = \Delta L/L$ representa percentual de deformação

Importante:

Esta constante é característica Física do material e é diferente para diferentes tipos de deformações, porém é *independente da forma, do tamanho da amostra e da força aplicada*, é denominado de Módulo de Elasticidade (G).

$$\frac{F/A}{\Delta L/L} = G \quad \text{daí} \quad \frac{F}{A} = G \frac{\Delta L}{L} \quad \text{Eq. 1.1}$$

Quando o esforço é de **tração ou compressão** o **Módulo de Elasticidade** é dito **Módulo de Young**, representado pela letra **E**. Nesse caso, na expressão acima se troca o **G (tensão de cisalhamento ou torção)** pelo **E (tração ou compressão)**, isto é, aquilo que **estica ou comprime**). Onde L é o comprimento inicial, também denotado por L_0 (x_0).

Dentro deste espectro conceitual da Lei de Hooke, podemos ter também que a ação da carga seja aplicada a todo o volume do corpo, sendo assim:

$$\frac{F/A}{\Delta V/V} = B \quad \text{daí} \quad \frac{F}{A} = B \frac{\Delta V}{V} \quad \text{ou} \quad p = B \frac{\Delta V}{V} \quad \text{Eq. 1.2}$$

Embora o desenvolvimento matemático parta da conceituação geral da Lei de Hooke, agora a amostra tem variação de volume e a **Tensão é a própria Pressão**; neste caso, o Módulo de Elasticidade é dito de Módulo de Compressibilidade e é representado pela letra **B**. Isto é usado na compreensão de Compressão Hidráulica. Daí a importância de se conhecer a construção da Lei de Hooke e notar como essa ideia chega a tensão superficial que é posta no contexto da hidrostática.

Nesse momento há necessidade de compreender e diferenciar os significados de Tensão (“Força” por unidade de área) e de Pressão (Força por unidade de área).

Assim, se um elemento de superfície se situa num meio (externo ou interno), então as forças que atuam sobre esse elemento são geralmente proporcionais a sua área. Essa *força* por unidade de área é denominada de tensão, que pode atuar nas formas tangenciais ou normais à superfície sobre as quais atuam (NUSSENZVEIG, vol. 2, 1986, p. 1), e daí ter-se.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Eq. 1.3}$$

Sendo:

σ Tensão de cisalhamento média ou Tensão cortante média.

F Força de cisalhamento total ou Força cortante total

A Área cisalhada ou Área projetada da superfície cortante.

Para que se possam perceber estas representações de força (ou tensões) a figura

1.6, tem a compreensão de diferentes tipos de tensões normais e tangenciais.

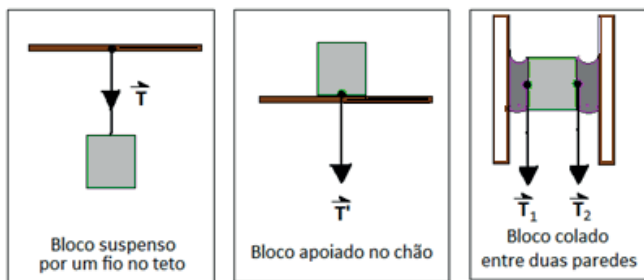


Fig. 1.6 Mesmo bloco em três situações físicas diferentes.

NUSSENZVEIG, 1986, p. 2

Tem-se no **primeiro caso**, da figura 1.6, o bloco de massa m suspenso por fio ideal ou inextensível, localizado no teto, exercendo sobre um elemento de superfície do teto uma tensão \vec{T} normal ao mesmo, chamada de *tração*; no **segundo caso**, o bloco está apoiado no chão, e exerce sobre um elemento de superfície do chão uma tensão \vec{T} normal ao mesmo, chamada de *compressão*, ou *pressão*; no **terceiro caso** o bloco está colado entre duas paredes, sendo o elemento de superfície de contato dada pelo bloco com a cola, onde o bloco exerce sobre a cola as *tensões* \vec{T}_1 e \vec{T}_2 tangenciais, chamadas de *tensões de cisalhamento* (deformação ao longo da aplicação de força). Como a força de atrito que é uma força de cisalhamento⁴.

Dessa forma se compreende que, quando um **fluido** está submetido às forças tangenciais, o mesmo se escoar enquanto a força estiver sendo aplicada, pois no terceiro caso da figura 1.6, o bloco sobre ação da força peso, escorrega-se entre as paredes enquanto a cola flui, vindo a se equilibrar após a solidificação da cola que é o instante quando ocorre equilíbrio entre as forças peso e normal e as forças tangenciais.

Por isso, num fluido em equilíbrio (velocidade nula) não pode haver tensões tangenciais. Isso justifica a compreensão de que, em repouso, tem-se a *superfície livre* do líquido, também chamada de *superfície estacionária*, que não é determinada pelo recipiente que contém o líquido. Por exemplo, um recipiente pode ter um fundo de forma ondulatória, mas, ao colocar água nesse recipiente, a superfície da água cobrirá as formas ondulatórias e não deixarão transparecer em sua superfície o fato do fundo ter forma ondulatória.

Embora na caracterização de superfície livre do líquido compreenda-se que não há

4. Daí ser errôneo comunicar o fato de que um objeto ao entrar na atmosfera terrestre fica incandescente devido a força de atrito, pois o que ocorre fisicamente, no objeto quanto a sua incandescência não se deve a força de cisalhamento, enquanto torque (o que não é de fato para esse tipo de interpretação física) mas a compressão adiabática que o objeto sofre na entrada da atmosfera.

forças tangenciais fica então caracterizado que, nessa situação, existem outros tipos de forças, denominadas de *forças internas da atração e/ou repulsão entre moléculas do fluido, como também das tensões internas entre o fluido e paredes do volume que o limita*. E, é aqui que entra os trabalhos de tensão superficial num líquido.

Essas *forças superficiais*, ditas de *curto alcance*, que podem ser transmitidas através de uma superfície S considerada no contexto do problema, como, por exemplo, a superfície de um copo totalmente cheio de água ou a superfície de um lago ou a superfície de certa quantidade de mercúrio nem tudo de ensaio, dentre outros, vai ser o referente físico que irá ser abordado com mais ênfase nesse trabalho.

COMPREENDENDO A PRESSÃO E A DENSIDADE

Enquanto a compreensão de *pressão* ou força de compressão que é a razão entre esta força (perpendicular à superfície S) por unidade de área, ou seja, expressa como:

$$p = \frac{F}{A} \quad \text{Eq. 1.4}$$

Observa-se com isso que as equações 1.3 e 1.4 têm mesma forma no segundo membro, porém, com significados físicos diferentes, pois, F na equação 1.3 causa o alongamento na barra e σ é a tensão de corte (cisalhamento) que ocorre na ação sobre mecanismos que podem torcer a barra com a aplicação da força F; o elemento de interesse, nesse caso, é $\varepsilon = \Delta L/L$ (percentual de deformação), ou torque longitudinal; enquanto que F na equação 1.4 é interação perpendicular à área da superfície de interesse, podendo, dependendo de o material, vir a quebra-lo ou esmaga-lo, por exemplo, uma pessoa não pode mergulhar a grandes profundidades por causa da pressão sobre seu corpo que pode esmaga-lo. Isto significa que sólidos e líquidos transmitem forças de formas diferentes. *Num líquido esta força é uniformemente transmitida em todas as direções fazendo-o fluir*. Portanto a pressão é a mesma em qualquer ponto do fluido no regime estático.

Assim, a pressão num ponto do fluido em equilíbrio é a mesma em todas as direções e a resultante das forças que atuam sobre cada porção do fluido se anula.

Neste contexto pode-se pensar: o que acontece com um fluido, líquido, por exemplo, quando se coloca sobre sua superfície livre um corpo de massa m? por exemplo, um pedaço de cortiça, ou pedaço de madeira ou um pedaço de gelo sobre a superfície da água. Em princípio sabe-se que existe *força de compressão* sobre a superfície livre do líquido exercida pelo corpo; mas, seria essa compressão a causa de fazer o corpo sobre esta superfície, ficar sobre a mesma ou imergir (parcialmente ou totalmente) nesse líquido? Para compreender este fato, ao falar de corpos rígidos as Leis de Newton vão se conformar na compreensão interativa de *Força e Massa*, da Mecânica Clássica, como elementos

físicos que tomam lugar de interesse e o modo de pensar esses objetos físicos.

Mas, em fluido o interesse toma outra conformação que está nas propriedades físicas “que variam ponto a ponto em toda extensão da substância do que em aglomerados específicos dessa substância”, segundo Halliday & Resnick (1991, p. 78, vol. 2) e, nesse contexto faz *mais sentido* falar dos objetos físicos, **densidade e pressão**, que força e massa, para uma interação de **longo alcance**, como é o caso da densidade e pressão. Isso é o que vai diferenciar dos objetos físicos **tensão superficial** e **capilaridade** que possuem interação de curto alcance, dentro de fluidos na hidrostática.

Nessa direção tece-se o olhar físico para compreensão de *densidade* de um fluido estático, em qualquer ponto do mesmo.

Por falar em pontos de fluidos, especifica-se que essa compreensão está na visão macroscópica, onde a porção de referência para um ponto do mesmo é muito maior que as dimensões subatômicas (microscópicas) do fluido, fato que concerne a *idealização de fluidos como sendo perfeitamente contínuos*, ou hipótese do contínuo.

Isso revela processos físicos da mecânica de meios contínuos que permite empregar equações fluídicas para gases e líquidos concomitantemente; esse fato é às vezes denominado de *hipótese do contínuo*. Compreendido isso, **define-se densidade**⁵ de um fluido em qualquer ponto do mesmo como sendo a razão entre a massa e o volume contido nessa massa. Como pressão, essa também é grandeza escalar.

$$d = \frac{m}{V} \quad \text{Eq. 1.5}$$

A compreensão física da grandeza densidade está relacionada a um corpo, enquanto que massa específica refere-se à *matéria* que constitui o corpo. Pois, um corpo pode ter características físicas macroscópicas de cor, textura, sabor, brilho, granular, sólido, líquido ou gasoso, dureza, massa, volume e compressibilidade dentre outros atributos físicos que se possa identifica-lo, mas é a *homogeneidade da matéria o laço que une a compreensão conceitual de densidade e massa específica*, embora a representação matemática seja idêntica à da densidade.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{Eq. 1.6}$$

Dentro dessa visão é possível ter, por exemplo, dois materiais: água do rio e água

5. Faz-se saber que este conceito está para compreensão de massa específica, pois fora estruturado na visão da homogeneidade da matéria; aqui não se olha para, por exemplo, uma esfera de aço oca, cuja densidade dessa esfera é diferente para mesma esfera de aço maciça (uma vez que ambas terão o mesmo volume, mas a massa das duas são diferentes entre si). Geralmente, no primeiro caso chama-se de densidade do objeto físico enquanto que no segundo caso é denominado de massa específica do aço. Sendo assim esclarecido, informa-se que o conceito de massa específica está interligado com o de densidade, para gases e líquidos. Para diferenciar, às vezes usa-se m para massa específica e ρ para densidade, ambas definidas com a razão massa por unidade de volume. Daí a necessidade de conceituação de elementos físicos.

do mar, ou água doce e água salgada. Os dois materiais de interesse é apenas água. A diferença aparente e imediata entre elas é o sabor. Mas o que diferencia fisicamente, uma da outra? A massa específica. A água (doce) tem massa específica de 1,0 g/cm³ enquanto a água do mar (salgada) tem massa específica 1,026 g/cm³. Logo, a massa específica (homogeneidade da matéria) é uma grandeza física do material ou substância.

Observe que o conceito de densidade não depende da quantidade de matéria que se está analisando e, nesse sentido, ela é uma grandeza intensiva e vai sempre exibir o mesmo valor, embora os elementos que a compõe sejam massa (m) e volume (V) que são grandezas extensivas e, dependem do tamanho da amostra, ou seja, são somativas.

Além disso, as propriedades intensivas por unidade de massa são ditas específicas, por isso, a caracterização de massa específica, para diferenciar de densidade do corpo.

Desse modo, as propriedades intensivas só se definem em sistemas em equilíbrio, daí o seu valor ser o mesmo para todos os pontos, como na hidrostática.

Observe que a massa específica m, é uma propriedade intensiva que pode variar de ponto a ponto em um sistema, uma vez que:

$$m = \int_{V_1}^{V_2} \rho dV \quad Eq. 1.7$$

Enquanto que o volume específico será dado por

$$v = \frac{1}{\rho} \quad Eq. 1.8$$

Observe que o conceito de densidade é usado dentro do contexto laboratorial que envolve fluidos, como sangue e urina, por exemplo. Como também é para os minérios, onde se tem duas classificações que são: **densidade real** ou **relativa** e a **densidade aparente**. No primeiro caso, não se considera os espaços vazios entre os grãos da amostra em análise e, no segundo caso, considera-se o volume dos espaços vazios entre os grãos, ou seja, considera-se o volume total.

$$Densidade\ real\ ou\ relativa > Densidade\ aparente$$

Em geral a densidade relativa é obtida com relação a uma densidade conhecida, daí a sua compreensão de densidade relativa. Assim, ao se tomar a água como densidade padrão, a densidade relativa será obtida a partir desse contexto, ou seja, será um valor relativo a densidade da água que é 1,00000 g/cm³, para a temperatura de 4°C, como diz Sampaio e Silva (2007, p. 37, texto)⁶. E, ainda desses autores, tem-se que:

6. SAMPAIO, J. A.; SILVA, F. A. N. G.. **Determinação das densidades de sólidos e de polpa**. IN: Tratamento de Minérios: práticas laboratoriais. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2007. p. 37-51. Disponível em <<http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/1019>>. Acesso em 03 de jan. de 2022.

“a densidade é função dos raios dos átomos e íons que constituem os minerais, quer dizer, depende da forma como esses constituintes arranjam-se na estrutura cristalina dos minerais. Assim, o peso atômico do potássio é 1,7 vezes maior que o do sódio, e a densidade do KCl (1,98) é menor que a do NaCl (2,17). A diferença dos raios atômicos entre o K^+ (1,33) e Na^+ (0,98) justifica essa diferença e explica o pronunciado efeito sobre o volume dessas substâncias cristalinas. Entretanto, as variações periódicas da densidade com o número atômico não se repetem igualmente com a periodicidade dos números atômicos. Essa discrepância pode esclarecer porque a faixa de valores da densidade dos minerais varia desde pouco mais de 1,0 até 23,0, valores que são encontrados em alguns minerais”.

Isso mostra o quanto é importante a compreensão de densidade para o contexto do ensino de física. Observe que o uso desse objeto físico está na biologia, na química e na linguagem físico-matemática, como um construto interior as Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias; mostrando importância dentro da ciência física em diferentes contextos.

DE VOLTA A COMPREENSÃO DE TENSÃO

Voltando a compreensão de Tensão observa-se que, independente da constante de proporcionalidade entre tensão e deformação, pode-se ver que, de modo geral o conceito de tensão está associado à deformação, da seguinte forma:

$$\text{Tensão} = \text{Módulo de Elasticidade} \times \text{Deformação}$$

Expressando isso de forma de linguagem física e matemática, tem-se:

$$\frac{F}{A} = E \frac{\Delta L}{L} \quad \text{ou} \quad \sigma = E |\epsilon| \quad \text{Eq. 1.9}$$

Ou, semelhantemente:

$$\frac{F}{A} = E \frac{\Delta L}{L_0} \therefore F = \left(\frac{EA}{L_0} \right) \Delta L \text{ tomando } k \equiv \frac{EA}{L_0} \text{ e } x \equiv \Delta L$$

Logo:

$$F = kx \quad Eq. 1.10$$

Observe como aparece de forma “natural”, na física matemática, o conceito antes produzido dentro de uma concepção analítica do referente físico

tensão a força de deformação

Similarmente, fazendo análise gráfica da tensão y versus a deformação x , tem-se, no modo cartesiano, uma característica dada pela função $y = y(x)$, na forma linear:

$$y = kx \quad Eq. 1.11$$

Como a Lei de Hooke se refere a **Força Restauradora**, isso significa que a mesma tem a tendência em se manifestar de forma a tender restaurar-se enquanto está sob tensão deformadora, ou alongamento e, para expressar essa linguagem da física-matemática, coloca-se o sinal de menos, que na forma vetorial apresenta-se como.

$$\vec{F} = -k\vec{x} \quad Eq. 1.12$$

Assim, quando o deslocamento for no sentido positivo⁷ à ação da força é no sentido negativo e vice-versa, de modo a prevalecer o conceito de *tensão igual ao módulo de elasticidade vezes a deformação que é o significado físico de tensão*.

Aqui há dois significados físicos muito próximos, enquanto representação conceitual, que são o de **tensão** e de **força**, mas muito diferentes entre si, em sua qualidade.

A representação de F para explicitar a Tensão e, ao mesmo tempo explicitar o conceito de Força que tem a característica física de interpretação como mudança de movimento, um dos princípios da dinâmica na Mecânica Clássica, não são identidade conceituais. Pois, a Tensão é uma *qualidade* de força, porém de aplicação num ponto, de torção, compressão, elasticidade e/ou de tração, sem necessariamente oferecer a condição de movimento característica conceitual da Força na segunda Lei de Newton, por exemplo.

Esta compreensão física fora explicitada no transcorrer do texto quando se usou

7. Convenção matemática de positivo para direita e negativo ao contrário. Ou positivo para cima e negativo para baixo.

a palavra CARGA, não como propriedade da matéria, como em eletricidade, mas como carregamento de quantidades adicionais de massa m que dá a noção de peso, que é a força originária da ação do campo gravitacional, $\vec{P} = m\vec{g}$ (força peso).

Outro fato físico no caminhar da significação de Tensão é o uso da palavra ESTICAR, como sinônimo de alongar ou deslocar, que, no contexto da aplicação da carga, se apresenta como movimentar-se, no sentido de deformar o comprimento inicial da mola, numa direção com sentido, ou seja, num **deslocamento** e, daí a compreensão vetorial da grandeza tensão ou força de tensão (força elástica). Observa-se assim que o gráfico da figura 1.7 tem matemática apropriada no contexto de criação do objeto tensão, estando representado em sua forma escalar e analítica, quanto à natureza de força restauradora na referida figura.

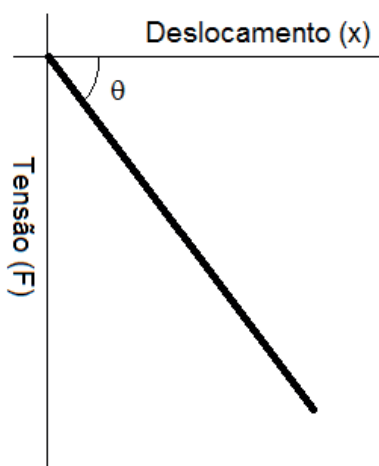


Fig. 1.7 Representação gráfica do experimento da Lei de Hooke

De modo geral, a equação, $y = kx$, não é tão simples assim. Ela é uma boa aproximação da equação polinomial geral:

$$y = A + Bx + Cx^2 + Dx^3 + \dots \quad Eq. 1.13$$

Onde, A, B, C, D são constantes reais. No caso de $x = 0$ quando $y = 0$, isto é, quando não há tensão e nem deformação, então $A = 0$.

Resultados experimentais mostram que as constantes C, D, ..., tem valores extremamente pequenos, infinitesimal, e dessa forma, tem-se que:

$$y \approx Bx \quad Eq. 1.14$$

Outra importante caracterização física da Lei de Hooke está na relação entre ESTRESSE e TENSÃO que ele denomina de módulo.

Daí ter-se o uso correto da natureza física da tensão na expressão, $F = kx$, para a **intensidade** da Força Restauradora, também tida como força resistente ao torque.

Outro fato físico é que: ao provocar uma tensão, como no exemplo da figura 1.1 (mola distendida), sabe-se que, ao soltar a mola ele deve voltar ao seu estado natural, desde que não haja excesso de aplicação da carga. Isto faz compreender a existência de um *excesso de energia acumulada* quando a mola é levada a realizar um trabalho com a aplicação da carga (força) para distender da quantidade x .

O gráfico 1.7 explicita o fato físico de que a força realiza um trabalho quando desloca a mola de uma distância x (área do triângulo). Esse é o trabalho elástico realizado pela mola, ou seja, a Energia Elástica que se acumula quando a mola é distendida por uma distância x (ou altura), sem atrito, que é outro elemento físico na compreensão da tensão. Assim, se $E = -3J$, então a mola suporta energia de até $+3J$ para não a deformar, no que diz respeito a possibilidade de seu vai e vem, ou movimento no sistema massa-mola, que não é o objetivo desse estudo no momento.

$$E = -\frac{1}{2}kx^2 \quad \text{Eg. 1.15}$$

Essa compreensão da Lei de Hooke, vai se casar com o modelo físico e matemático do sistema massa-mola, quando a massa m , executa um movimento, sobre um superfície sem atrito, a partir de um alongamento na mola que está atrelada a massa e, quando essa massa, presa a mola é solta, o sistema executa um Movimento Harmônico Simples (MHS), que não será abordado no momento, embora haja similaridade entre os modelos.

Veja a seguir a figura 1.8, que representa o MHS e, ao mesmo tempo, mostra como o significado de força restauradora e apresenta e as equações matemáticas que envolve o princípio físico desse conceito.

Observe os casos onde $F = -kx$ e o caso $F = +kx$. Isso é importante para análise gráfica de (x, y) , para $y = kx$, onde y confunde-se com a tensão F .

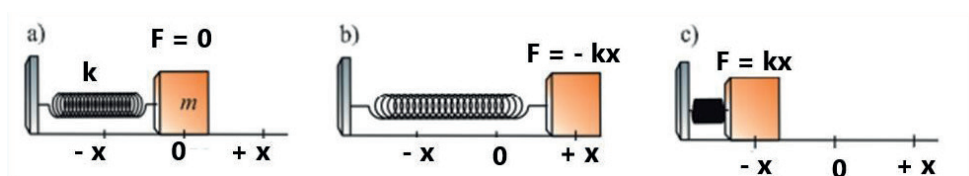


Fig. 1.8 Três situações para o MHS do sistema massa-mola.

Há algo muito significativo a ser falado nesse contexto conceitual que envolve as molas. Quando se estuda a Lei de Hooke, é preciso compreender que a mesma é posta no contexto estático, enquanto que no Movimento Harmônico Simples⁸ (MHS) o sistema é posto em movimento no qual **não há forças dissipativas** e, sendo assim, é preciso compreendê-lo no modelo dinâmico, desse modo, há um período, ou intervalo de tempo no qual o vai-e-vem da mola se repete, numa certa amplitude X, e, sem entrar em detalhes, no momento, pois esse não é o objetivo aqui desejado, apresenta-se a forma de se calcular esse período para um MHS, o qual envolve a massa m do sistema massa-mola.

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad Eq. 1.16$$

8. Regido por uma matemática de funções trigonométrica ou harmônicas, daí a caracterização de MHS

ASSOCIAÇÃO DE MOLAS

EM SÉRIE

Vamos supor que tenhamos três molas de comprimento x_1 , x_2 e x_3 , onde cada uma está ligada a outra, de modo a formar uma linha com as três molas de comprimento x_T .

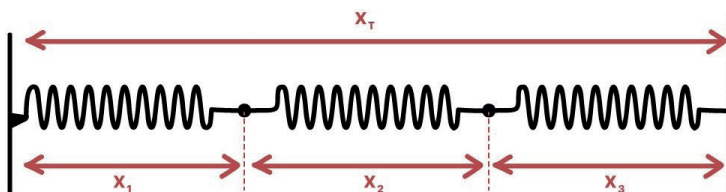


Fig. 1.9 Associação de molas em série

<<https://blog.professorferretto.com.br/associacao-de-molas/>>

Agora, suponha que fora feito um deslocamento para a direita, a partir da mola 3. Haverá um incremento de deslocamento total Δx_T e, desse modo, o novo comprimento da mola será $(x_T + \Delta x_T)$. Evidentemente que, semelhante situação deverá ocorrer para cada uma das molas que ficarão com comprimentos finais $(x_1 + \Delta x_1)$, $(x_2 + \Delta x_2)$ e $(x_3 + \Delta x_3)$.

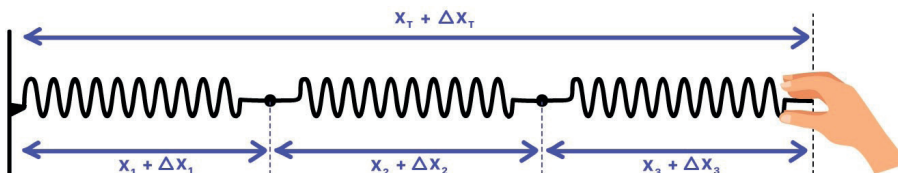


Fig. 1.10 Três molas puxadas para direita

<<https://blog.professorferretto.com.br/associacao-de-molas/>>

Onde:

$$\Delta x_T = \Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3 \quad \text{e que} \quad F_T = F_1 = F_2 = F_3$$

$$\text{Onde } \Delta x_T = \frac{F_T}{k_{eq}}; \Delta x_1 = \frac{F_1}{k_1}; \Delta x_2 = \frac{F_2}{k_2} \text{ e } \Delta x_3 = \frac{F_3}{k_3}$$

$$\text{Com isso } \frac{F_T}{k_{eq}} = \frac{F_1}{k_1} + \frac{F_2}{k_2} + \frac{F_3}{k_3}$$

$$\text{Usando } F_1 = F_2 = F_3 = F_T \quad \text{logo} \quad \frac{F_T}{k_{eq}} = \frac{F_T}{k_1} + \frac{F_T}{k_2} + \frac{F_T}{k_3}$$

Com isso, essa equação torna-se:

$$\frac{F_T}{k_{eq}} = \frac{F_T}{k_1} + \frac{F_T}{k_2} + \frac{F_T}{k_3} \quad \text{daí} \quad \frac{1}{k_{eq}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} \quad \text{Eq. 1.17}$$

De forma semelhante acontece para 2, 4, 5, 6, , n molas. E **caso** as molas tenham o mesmo valor k, então a constante equivalente, para as n molas, será dada por:

$$k_{eq} = \frac{k}{n} \quad \text{Eq. 1.18}$$

Assim, se há 20 molas ($n = 20$) todas tendo o mesmo valor de 160 N/m para todas as constantes de molas ligadas em série, então a constante equivalente desse sistema de molas será dada por:

$$k_{eq} = \frac{160 \text{ N/m}}{20} = 80 \text{ N/m}$$

Logo, vamos supor que no laboratório tenha-se uma mola com $k_1 = 600 \text{ N/m}$ e outra com $k_2 = 300 \text{ N/m}$, mas esses valores não interessa para o projeto que está sendo feito, pois deseja-se uma mola com $k = 200 \text{ N/m}$. Para resolver esse hipotético problema, faz-se uma associação em série dessas duas molas e calcula-se o valor da constante equivalente entre elas duas.

$$\frac{1}{k_{eq}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \quad \text{ou} \quad \frac{1}{k_{eq}} = \frac{1}{600} + \frac{1}{300} = \frac{1+2}{600} = \frac{3}{600} = \frac{1}{200}$$

$$\text{Daí} \quad \frac{1}{k_{eq}} = \frac{1}{200} \quad \text{ou seja} \quad k_{eq} = 200 \text{ N/m}$$

EM PARALELO

Suponha que temos duas molas com k_1 e k_2 diferentes entre si e, estando essas duas molas de mesmo comprimento, conectadas e penduradas a uma mesma plataforma, de modo a se ter as duas molas em paralelo, conforme figura 1.11, que se segue.

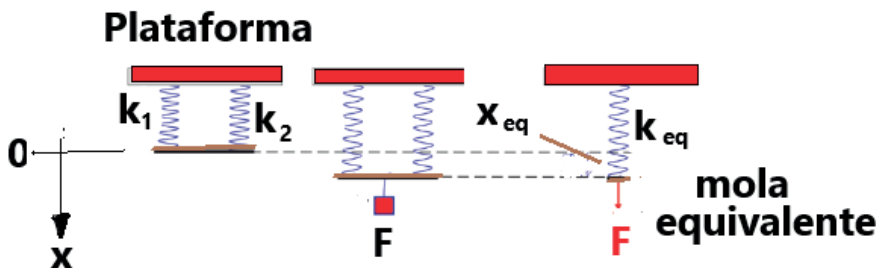


Fig. 1.11 Associação de três molas em paralelo

<<https://www.researchgate.net/journal/Revista-Brasileira-de-Ensino-de-Fisica-1806-9126>>

Atrai-se ao conjunto de molas uma massa m que faz produzir uma força de intensidade F (força peso) conforme a parte dois da figura 1.11. Essa força traciona as molas que se distende da distância X_{eq} , conforme a parte três da mesma figura. A ideia agora é calcular o K_{eq} dessas duas molas. Pelo exposto, assume-se que as duas molas se distendem igualmente. E, desse modo:

$$(x_1 + \Delta x_1) = (x_2 + \Delta x_2) = (x_{eq} + \Delta x_{eq}) \quad Eq. 1.19$$

Analisando o contexto da parte um e dois da figura acima, tem-se que:

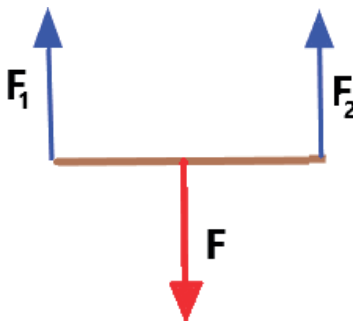


Fig. 1.12 Conjunto de forças aplicadas a duas molas em paralelo

De modo que.

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F} = 0 \quad \text{daí} \quad \vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$$

$$\text{Ou seja} \quad k_{eq} \Delta x_{eq} = k_1 \Delta x_1 + k_2 \Delta x_2$$

$$\text{Como } \Delta x_{eq} = \Delta x_1 = \Delta x_2 \quad \text{vindo da equação 1.19}$$

Então a ligação em paralelo das duas molas tem:

$$k_{eq} = k_1 + k_2 \quad Eq. 1.20$$

De modo geral, isso vale para, também, para 3, 4, 5, ..., n molas ligadas em paralelo.

Se há n molas, todas com a mesma constante k e, estando ligadas em paralelo, então:

$$k_{eq} = nk \quad Eq. 1.21$$

Vale salientar que, da configuração 1.11 e 1.12, há uma correlação de equilíbrio no conjunto das forças. Se o corpo de massa m, da figura 1.11 se apresenta fora do ponto mediano, o modelo ora apresentado **não** seria o mesmo para a determinação da constante equivalente. Pois, se o corpo ficar mais perto do ponto 1, a mola, com constante k_1 deve apresentar um alongamento diferente da mola com constante k_2 e, isso deve influenciar o valor da constante equivalente para fora da equação 1.20. Se isso ocorrer, deve-se fazer o procedimento físico do equilíbrio de forças, levando em consideração onde se localiza o ponto de apoio do corpo de massa m, e, com isso, desenvolver os aspectos analíticos dos procedimentos físicos e matemáticos no contexto laboratorial que se apresenta no experimento com massa m fora da posição de equilíbrio. Na realidade esses estudos são modelos e, como tal, representam algo muito próximo das condições reais. Esse é o trabalho do físico, buscar-trabalhar modelos físicos-matemáticos.

EQUILÍBRIO ESTÁTICO

A física envolvida no significado de Tensão vai estender-se ao significado de Tensão Superficial que também está posto na Física Clássica junto as Leis de Newton, e possuem mecanismos de compreensão na elasticidade através do conjunto de duas equações fundamentais na Mecânica Clássica; isto para problemas com estruturas físicas que podem ser determinadas, nesse quadro conjectural, segundo Halliday & Resnick (vol. 2, 1991). Assim, deve-se ter num primeiro momento as equações do Equilíbrio Estático.

$$\sum \vec{F}_{ext} = 0 \quad Eq. 1.22$$

A condição 1.22, quando vistas numa superfície (plano xy, por exemplo) tem-se, a imposição do Equilíbrio das Forças.

$$\sum F_x = 0 \quad Eq. 1.23$$

$$\sum F_y = 0 \quad Eq. 1.24$$

Estas condições para o corpo rígido denotam no conjunto que a *aceleração linear do centro massa do corpo rígido é nula*, que é a primeira lei de Newton. Mas, sozinha esta condição permite que o corpo rígido gire. Para que a condição geral de equilíbrio esteja completa deve-se exigir a *não rotação* do corpo rígido, ou seja, a *aceleração angular* deve ser nula. Isto impõe a condição de Equilíbrio dos Torques.

$$\sum \sigma_{ext} = 0 \quad Eq. 1.25$$

A condição 1.25 quando numa superfície (plano xy, por exemplo), indica que os torques são todos paralelos, ao eixo x, assim tendo:

$$\sum \sigma_{Total} = 0 \quad Eq. 1.26$$

São estas condições físicas que norteiam os princípios da elasticidade de um corpo rígido, conforme estruturou Hooke em sua Lei Física de Tensão sobre estes corpos.

Contudo, faz-se saber que o conceito de Elasticidade está assentado dentro da visão microscópica da matéria, que tem estrutura interna conhecida como *rede cristalina*, onde átomos apresentam a característica de possuírem distâncias médias entre si muito semelhantes, conhecida como primeiros vizinhos.

Sendo assim, estas redes têm uma representação física de átomos vizinhos como se fossem ligados por “molas interatômicas”, segundo *op. cit.*, ou seja, a rede cristalina é um modelo *tensional* no qual, quanto mais dura for a “mola”, mais rígida deve ser a estrutura cristalina do material.

Embora se faça saber que há materiais que tem estrutura interna com alinhamento em cadeias moleculares flexíveis que dá a estes tipos de materiais uma flexibilidade bem diferente dos corpos rígidos, como borrachas, por exemplo.

Fato interessante é que quando a aplicação da Tensão num corpo quebra as redes cristalinas o processo de elasticidade finda com a deformação irreversível, ou até mesmo a quebra do material, como analisado na Lei de Hooke.

MOSTRANDO A CONDIÇÃO DA SOMA DAS ACELERAÇÕES ANGULARES EXTERNAS NULAS

A concepção da equação 1.25 é aceita como princípio físico da não rotacionalidade do corpo rígido, uma vez que pode ser comparada com a primeira Lei de Newton, como um axioma da física, mas a extensão desse princípio, como dado pela equação 1.26 é um efeito que necessita do desenvolvimento físico e matemático do contexto que a envolve, embora se compreenda sua causa.

Para tal, faz-se saber que quando se estuda corpo rígido na Mecânica Clássica, ou seja, *quando se imagina um corpo cuja propriedades materiais nele contido o justifica como não tendo possibilidade de deformação* mas, isso está se tratando de modelo matemático (relativo às abstrações) pois, no mundo real, quando um corpo está submetido a forças aplicadas sobre o mesmo, sempre promovem deformações, mesmo que ínfimas, pelo menos no local do ponto de aplicação, como na aplicação de um impulso numa bola de futebol, aplicado por um jogador no momento de bater uma falta, num ponto da bola.

Assim, num primeiro momento, vamos tomar o corpo como tendo dois pontos de interesse: **o centro de massa** e **o centro de gravidade**. Esses dois pontos é abstração matemática oriunda da necessidade da realidade física a ser interpretada sobre a estática de corpos rígidos.

Pois, o centro de massa (CM) é uma propriedade ou característica do corpo, sendo assim, independe de forças externas aplicadas a ele.

Enquanto que o centro de gravidade (CG) é a linguagem física usada para expressar

o ponto de equilíbrio onde se aplica a força da gravidade resultante, de modo que se pode interpreta-lo como o ponto que equivale ao local de aplicação da resultante de todas as forças sobre todo o corpo, segundo Lages (s/d).

Essa propriedade do centro de gravidade não é intrínseca aos corpos rígidos, pois se o campo gravitacional não for constante a determinação do ponto de aplicação da força de gravidade total passa a depender da orientação espacial do corpo rígido, segundo op. cit. Mas, se o corpo rígido estiver submetido ao campo gravitacional constante, como a gravidade efetiva dada por $g = 9,80 \text{ m/s}^2$, como é o nosso caso e, considerado para todas as i -ésima partícula do sistema rígido (corpo rígido), o centro de massa (CM) coincide com o centro de gravidade (CG). Assim, um corpo de massa M contendo n partículas têm-se:

$$M = m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n = \sum_{i=1}^n m_i$$

O centro de massa será:

$$M\vec{r} = m_1\vec{r}_1 + m_2\vec{r}_2 + m_3\vec{r}_3 + \dots + m_n\vec{r}_n = \sum_{i=1}^n m_i\vec{r}_i$$

Escolhendo a **origem como o centro do sistema cartesiano**, tem-se que:

$$0 = m_1\vec{r}_1 + m_2\vec{r}_2 + m_3\vec{r}_3 + \dots + m_n\vec{r}_n = \sum_{i=1}^n m_i\vec{r}_i$$

Multiplicando pela aceleração da gravidade:

$$0 = m_1\vec{r}_1 x \vec{g} + m_2\vec{r}_2 x \vec{g} + m_3\vec{r}_3 x \vec{g} + \dots + m_n\vec{r}_n x \vec{g} = \sum_{i=1}^n m_i\vec{r}_i x \vec{g}$$

Como mg é a força peso ou força da gravidade, então cada vetor \vec{r}_i que é componente do vetor \vec{r} , representa um braço de alavanca entre a linha de ação da força peso e a origem do sistema que é o centro de massa.

A *origem* dessa compreensão física está na concepção é de **momento angular total**

de um sistema de n partículas, que é definido por:

$$\vec{J} = \sum_i m_i \vec{r}_i \times \vec{v}_i \quad \text{Eq. 1.27}$$

$$\vec{J} = \sum_i m_i \vec{r}_i \times \vec{v}_i = \sum_i \vec{r}_i \times m_i \vec{v}_i = \sum_i \vec{r}_i \times \vec{p}_i$$

Kibble (1970, p. 154), faz a leitura da dinâmica dos corpos rígidos dizendo que “quando as forças internas forem centrais, a derivada temporal do momento angular é igual a soma dos momentos das forças externas”. Assim, da equação 1.27 tem-se que:

$$\frac{d\vec{J}}{dt} = \sum_i \vec{r}_i \times \vec{F} \quad \text{Eq. 1.29}$$

$$\text{Sendo } \frac{d\vec{J}}{dt} \text{ concebido como TORQUE}$$

A equação 1.29 representa o *Torque* ou *momento angular* de um sistema com n partículas. De forma semelhante, pode-se fazer a leitura física de que:

$$\vec{r}_i \times m_i \vec{g} = \vec{r}_i \times \vec{P}_i \quad \text{que é idêntico a } \vec{r} \times \vec{F}$$

representa o torque (ou momento angular) que exerce a força de gravidade (força peso) sobre a i -ésima partícula com relação ao centro de massa.

Produto vetorial, brevíssima fala

Sejam **A** e **B**, dois vetores não nulos. O produto vetorial entre eles será dado por:

$$\vec{A} \times \vec{B} = \vec{C} \quad \text{ou} \quad \vec{C} = [(AB)\text{sem } \theta]\hat{c} \quad \text{Eq. 1.30}$$

Sendo o vetor **A** posto no eixo-x, o vetor **B** posto no eixo-y e, fazendo o giro com a mão direita aberta e posta no vetor **A**, fechando os dedos na direção do ângulo que leva ao vetor **B**, tem-se o vetor **C**, dado pelo polegar que aponta para cima ou eixo-z. Sendo o módulo do vetor **C** dado pelo produto escalar do módulo dos vetores **A** e **B** e o seno do

1. Grifo de Mario de Souza.

ângulo que os vetores **A** e **B** fazem entre si. Por exemplo, se o vetor **A** tem módulo dado por 3 N e o vetor **B** tem módulo 8 N, sendo o ângulo entre eles igual a 30° , estando os vetores **A** e **B** no plano xy, então o módulo ou intensidade do vetor resultante **C**, será dado por $C = 3 \times 8 \times \sin 30^\circ = 24 \times \frac{1}{2} = 12$ N, com direção no eixo-z, e sentido para cima, pois, por ser uma grandeza vetorial necessita de ter intensidade, direção e sentido. Caso os vetores **A** e **B** estivessem na condição de configuração contrária, vista até o momento, ou seja, vetor **A** no eixo-y e vetor **B** no eixo-x, nesse caso, pela regra da mão direita, o vetor resultante **C**, dado por **A** x **B**, tem direção com eixo-z, mas o sentido é contrário, ou seja, para baixo, o que representa um valor escalar negativo.

Continuando

Vale lembrar, nesse momento, visto das equações até agora apresentadas e de sua concepção física mostra que o **torque é uma grandeza vetorial** e, isto quer dizer que, em cada ponto de massa m_i , existe um vetor resultante do torque apontando para fora da superfície, pois esta grandeza vetorial é o *produto vetorial* e sua geometrização pode ser vista pela regra da mão direita (parafuso), como antes fora explicado.

Desta forma, cada massa m_i tem um ponto que representa o vetor apontando para fora da superfície, devido ao produto vetorial, com vista a equação dada por:

$$\sum_{i=1}^n \vec{r}_i \times m_i \vec{g} = \sum_{i=1}^n \vec{r}_i \times \vec{P} = \frac{d\vec{J}}{dt} \quad \text{semelhante a Eq. 1.31}$$

Considerando um plano xy, para simplificação gráfica, a superfície é uma área delimitada pelo corpo rígido. Assim, cada ponto é representado por (X_i, Y_i) .

Nestas condições tem-se $\vec{P}_i = m_i \vec{g}$ apontando para baixo (eixo y), coincidindo com ordenadas y_i e por ser paralelo (ângulo entre os vetores é zero) e o produto vetorial $\vec{y}_i \times \vec{P}_i = [(y_i P_i) \hat{y}] \sin 0^\circ = 0$ (partindo da definição de produto vetorial).

Isto significa que o produto vetorial que age em cada massa m_i será devido a abscissa X_i e, ao mesmo tempo, é perpendicular à força peso; pela definição de produto vetorial $\vec{x}_i \times \vec{P}_i = [(x_i P_i) \hat{x}] \sin 90^\circ = (x_i P_i) \hat{x}$. Isto quer dizer que cada ponto contribui com um vetor **resultante** na direção perpendicular a "x" e a soma total desses vetores, que formarão uma linha vetorial sobre a área que circunda o corpo rígido tem torque total apontando nessa direção, que também será nulo (ver-se-á as razões físicas).

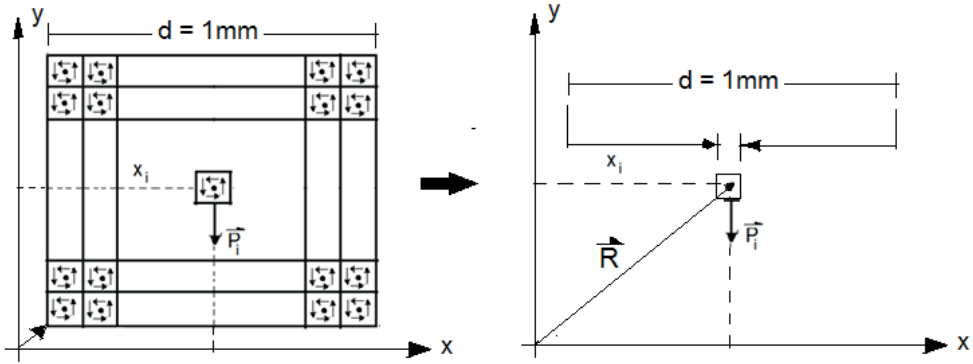


Fig. 1.13. Visão esquemática do produto vetorial no plano

Na parte dois dessa figura representa-se todo o plano de 1 mm^2 , próximo a ideia de um ponto.

Segundo Kibble (1970), para sistemas isolados tem-se a Lei de Conservação do momento angular:

$$\vec{J} = \text{constante} \Rightarrow \frac{d\vec{J}}{dt} = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^n \vec{r}_i \times \vec{P} = \frac{d\vec{J}}{dt} = 0$$

Ou seja:

$$\sum \sigma_{Total} = 0 \quad \text{que é a mesma Eq. 1.26}$$

Esta concepção física está no fato de que a aceleração angular é nula. Supondo que não seja nula, isto quer dizer que há giro livre do corpo rígido em torno de um eixo principal, nestas condições:

$$\vec{J} = I\vec{\omega} \quad \text{Eq. 1.32}$$

Onde I é momento de inércia do corpo e ω é a velocidade angular. Assim, desde que *nenhuma força externa* atue sobre o corpo, tem-se que:

$$\frac{d\vec{J}}{dt} = I \frac{d\vec{\omega}}{dt} \quad \text{como} \quad \frac{d\vec{J}}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\vec{\omega}}{dt} = 0 \quad \text{Eq. 1.33}$$

Fisicamente, a equação 1.26 impõe na condição de equilíbrio o fato de que a equação 1.32 seja válida, ou seja, isso acarreta que a *aceleração angular* seja nula.

Este espaço de discussão mostra que a física (Estática e Dinâmica) de corpos rígidos com fundamentação estrutural na concepção de uma formulação matemática, baseada nos contextos físicos para mostrar a condição de equilíbrio citada na equação 1.26, dentro da dimensionalidade da construção analítica da física. Isso se faz necessário compreender, uma vez que os estudos aqui desenvolvidos estão dentro do contexto estático para fluido, ou seja, para a hidrostática e, é condição de suficiência compreender esse contexto.

A compreensão física da equação 1.32 está associada a 1ª Lei de Newton e, dessa forma, a condição dessa equação implica que a aceleração linear seja nula. Ou seja, a soma de todas as forças sobre um corpo (resultante) é nula, fato que leva a aceleração angular ser nula. Nessa compreensão física, entende-se que o corpo que tem equilíbrio espacial, pode não tem equilíbrio rotacional, uma vez que lhes é permitido girar sobre um eixo. Para evitar esse problema é que entra a condição dada pelas equações 1.26 e 1.32.

Isto significa que sobtensão o corpo rígido não perde a característica física de centro de massa, embora mude sua forma ou volume quando submetidos às forças externas. E, o fato desse objeto físico ser de interesse nas relações entre a elasticidade e a tensão, faz compreender que na condição de equilíbrio, a mecânica que lhes incide em toda sua estrutura está centrada nas equações 1.32 e 1.26, conforme já foram mencionadas.

TENSÃO SUPERFICIAL

Elabora-se o significado físico de tensão superficial partindo-se da compreensão primeira da caracterização dimensional dos corpos físicos onde desfilam, de imediato duas propriedades macroscópicas bem conhecidas: massa e volume. Claro que há outras propriedades como textura, cor, elasticidade, forma e outras.

O volume é uma das grandezas matemáticas que está associada a dimensionalidade geométrica dos sólidos em três dimensões. Mas, na geometria plana, tem-se as dimensões de área e de comprimento, conhecidas como bidimensional e unidimensional. Sendo essas duas últimas grandezas associadas a geometria do corpo material. Elas não possuem significado físico concreto, no sentido de que, não se pega (toma as mãos) uma entidade matemática de duas ou uma dimensão.

Por exemplo, um trilho ou um fio de cabelo, ou uma linha de costura é caracterizado como um objeto matemático de uma dimensão, enquanto que uma placa é caracterizada com superfície, que possui uma área, ou seja, possui duas dimensões. Embora, tanto a linha quanto a placa tenham existência física de três dimensões, mas a geometria que está predominando nessas configurações as reduza para uma e duas dimensões.

Este fato cria conceitos físicos que relaciona a característica de qualidade no objeto físico (massa (m), carga elétrica (q), peso (P), por exemplo) com essas dimensões, conhecidas como lineares, superficiais e volumétricas. Assim, para a característica do objeto físico na qualidade de **massa**, tem-se a *densidade linear de massa* (m/L), *densidade superficial de massa* (m/A) e a *densidade volumétrica de massa* (m/V). Assim, para o peso:

$$\gamma = \frac{P}{L} \quad Eq. 2.1$$

$$p = \frac{P}{A} \quad Eq. 2.2$$

$$\delta = \frac{P}{V} \quad Eq. 2.3$$

Na categorização dessas equações, a primeira é chamada de Força Efetiva; a segunda de Pressão e, a terceira de Peso Específico.

A segunda equação se estabelece na conceituação Física da força peso aplicada perpendicularmente na área de uma superfície S , o que se compreende como a força peso que pressiona (comprime) a área, sobre a referida superfície, na qual atua a força peso.

A equação 2.3, é propriedade específica do material ou peso específico, onde:

$$\delta = \frac{P}{V} \quad \therefore \quad \delta = \frac{mg}{V} \quad \therefore \quad \delta = \frac{m}{V} g \quad \therefore \quad \delta = \rho g \quad \text{Eq. 2.4}$$

Onde ρ é a massa específica e, desse modo, no Sistema Internacional de Medidas (SI), e no Sistema Técnico de Medidas, nas Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP) a água, o mercúrio e o ar, tem respectivamente, nas referidas unidades de medidas os valores para o peso específico: 1,0 kgf/m³; 13,6 kgf/m³; 1,2 kgf/m³ e 9,8 N/m³; 133,3 N/m³; 11,8 N/m³. A compreensão desses significados físicos faz com que se tenha o conceito de densidade, agora, atrelado a esses “novos” elementos tomados em referência a água e, com isso tem-se que a *densidade é a relação estabelecida entre o peso de um corpo (ou substância) e o peso do volume de água referente ao corpo (ou substância)*, tal conceito (densidade relativa) leva a ter-se outras expressões físico-matemática, que fazem parte do conteúdo de física fluido que está aqui tratado dentro do contexto da hidrostática.

$$d = \frac{P}{P_{\text{água}}} \quad \text{ou} \quad d = \frac{\rho}{\rho_{\text{água}}} \quad \text{ou} \quad d = \frac{\delta}{\delta_{\text{água}}} \quad \text{Eq. 2.5}$$

Esses elementos físico-matemático farão parte do contexto físico, Tensão Superficial que ora se inicia na compreensão da formação da *gota de água* por uma torneira que pode ser apreciado em suas etapas conforme a figura 2.1.

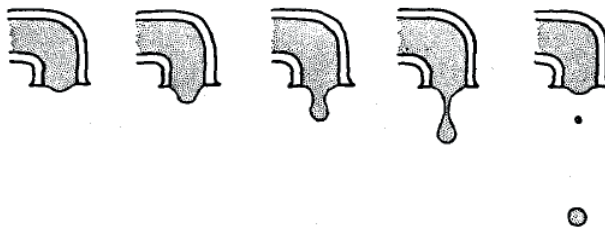


Fig. 2.1 Formação da gota de água

Fonte, ROGERES¹.

Na figura 2.1 há duas análises físicas importantes: *primeira*, a ação do Campo Gravitacional sobre a massa m na gota d'água; *segundo* a formação esférica da gota

1. ROGERS, Eric M. **Physics for the inquiring mind**: the methods, nature, and philosophy of physical science. Princeton, New Jersey: Princeton University, 1960 (p. 87).

d'água após desprendimento total da *membrana tensional* da água, na “boca” da torneira.

Nessa fase, a gota d'água experimenta ação do Campo Gravitacional na massa de água tornando-se esférica, por ação do Campo, uma vez que não existem preferências direcionais da ação do Campo. A esfera é a geometrização de energia mínima de formação; nesse contexto, seu volume é menor, guardada corretas proporções, que fosse outra figura como, por exemplo, um cubo. Vejamos essa comparação entre áreas de uma esfera (A_E) e de um cubo (A_C) com volumes iguais, $V_C = V_E$ (como se segue)

$$\text{Uma esfera tem volume } V_E = \frac{4}{3}\pi R^3 \text{ e Área } A_E = 4\pi R^2$$

Para que o cubo de aresta “a” tenha mesmo volume da esfera de raio R, deve-se ter:

$$V_C = V_E \text{ onde } V_C = a^3 \text{ daí } a^3 = \frac{4}{3}\pi R^3 \quad \therefore \quad a = R \left(\frac{4}{3}\pi \right)^{1/3}$$

Como a área do cubo é dada pela soma das seis áreas das faces do cubo

$$\text{Logo } A_C = 6a^2$$

$$A_C = 6 \left(R \left(\frac{4}{3}\pi \right)^{1/3} \right)^2 = 6R^2 \left(\frac{4}{3}\pi \right)^{2/3} = 6R^2 \left[\left(\frac{4}{3}\pi \right)^2 \right]^{1/3}$$

$$\frac{A_C}{A_E} = \frac{6R^2 \left[\left(\frac{4}{3}\pi \right)^2 \right]^{1/3}}{4\pi R^2} = \frac{6 \left[\left(\frac{4}{3}\pi \right)^2 \right]^{1/3}}{4\pi}$$

$$\left(\frac{A_C}{A_E} \right)^3 = \frac{216 \left(\frac{16\pi^2}{9} \right)}{64\pi^3} = \frac{216}{64} \frac{16\pi^2}{9} \frac{1}{\pi^3} = 1,91$$

$$\text{Daí } \frac{A_C}{A_E} = \sqrt[3]{1,91} = 1,24 \text{ ou } A_C > A_E \text{ pois } A_C = 1,24A_E$$

Compreende-se assim que o **esforço menor** pela ação do campo gravitacional está para formação da esfera que tem superfície de área menor que para o cubo de mesmo volume. Isto indica haver realização de trabalho físico sobre a superfície da gota d'água devido a Tensão Superficial, na sua interface, fazendo uso do Princípio de Mínima Ação.

Como então compreender uma superfície sobtensão superficial? Tomando a visão figurativa ou experimental da água num recipiente aberto em contato com o ar, numa temperatura ambiente, é possível remeter, num primeiro momento, de forma tácita, uma

comparação da superfície da água com uma fina membrana de borracha que cobre a abertura de um recipiente (um copo, por exemplo). Ao tocar na membrana de borracha tem-se a sensação de suas pequeníssimas oscilações devido a sua elasticidade e esta visão conecta, de forma tácita, com a membrana da água num recipiente, na interface entre a água e o ar, enquanto modelo físico, para compreender-se a ideia da tensão superficial.

Isto faz compreender que a água, nas Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP), divide regiões que não se misturam (água e ar), e, sendo assim, tem superfície de tensão na interface entre ela e o ar. É evidente que este fenômeno também ocorra entre outras superfícies como entre sólido-líquido, sólido-sólido, líquido-líquido (água e óleo).

A COMPREENSÃO DE INTERFACE NA TENSÃO SUPERFICIAL

O que é, então, uma interface²? Compreende-se como fina camada que existe entre duas superfícies em contato, diferentes entre si, onde sair de uma região para outra há mudanças de propriedades Física ou Química. Assim, quando a água sai do estado líquido para o estado de vapor ou vice-versa, ocorrem mudanças de propriedades físicas, como a densidade e pressão na região da interface, ou região de espessura zero (modelo que extrapola o contexto da membrana Física), mas vai para uma lógica de construção teórica possível entre esses meios e a tênue caracterização superficial.

A interface é um lugar de transformações e tem a ver com o líquido em questão, por exemplo, a água a temperatura de 20 °C, tem tensão superficial igual a $\gamma = 73 \text{ dyn/cm} = 7,3 \times 10^{-2} \text{ N/m}$, porém esse resultado pode ser alterado se mudada a composição Química da água, por exemplo, com a adição de solutos.

Assim, ao adicionar álcool (substância polar) na água, deve ocorrer interação molecular entre as moléculas da água e as do álcool; nesse processo o álcool produz aumento de tensão superficial e essa variação deve-se ao fato de ter-se concentrações mais efetiva na superfície dessa mistura que na região interior da mesma. Esse efeito é chamado de *absorção na interface*. É um processo físico e químico, que ocorre no limite entre as duas faces, ou seja, na interface desses dois líquidos.

Observa-se com isto que a atividade superficial tem natureza Química, pois, do mesmo modo que o álcool aumenta a tensão superficial da água, o detergente faz ao contrário, pois, o detergente possui estrutura Química não polar.

Em geral, as moléculas polares, denominadas de hidrofílica, têm estruturas que proporcionam afinidade com a água, diferente das não polares, conhecidas como hidrofóbica, que não tem afinidade com a água. Além disso, compreende-se que, além da

2. Esse é um conceito amplo e, pode ser construído como compreendido, como sendo duas ou mais ciências que se comunicam entre sistemas ou partes deles que, em princípio, essas partes ou sistemas são distintos e, não estariam diretamente conectados, mas possibilita meios de se complementarem via uma lógica possível de conexão.

afinidade superficial, há dependência da temperatura para a tensão superficial. Pois, se há aumento de temperatura, há aumento do grau de agitação das moléculas, ou aumento da energia cinética molecular.

Este efeito produz diminuição tensorial de vibração dessas moléculas em torno de um ponto, enquanto aumenta a energia cinética, tornando menos efetiva a força entre elas, fato que contribui com a diminuição da tensão superficial, na região da interface do sistema físico-químico. Esse é também um fato experimental. E, observou-se que a tensão superficial da água a 0 °C é $7,6 \times 10^{-2} \text{ N/m}$, enquanto que a 4 °C é $7,4 \times 10^{-2} \text{ N/m}$; cria-se a relação de que: a temperatura cresce quando a tensão superficial, diminui.

A dependência da tensão superficial com a temperatura foi descoberta pelo físico Húngaro Lóránd Baron von Eötvös (1848 – 1919) que estudara esse particular tema entre 1876 e 1886 junto com Franz Neumann em Königsberg, estabelecendo uma lei, em 1886, dada pela equação.

$$\gamma V_m^{2/3} = C_E (T_C - T) \quad \text{Eq. 2.6}$$

$$C_E = 2,1 \times 10^{-7} \text{ J/Kmol}^{2/3} \quad \text{é a Constante de Eötvös}$$

$$V = M/\rho \text{ onde } M \text{ é a Massa Molar e } \rho \text{ é a densidade}$$

$$(\gamma \text{ é a tensão superficial em } \text{N/m}; V \text{ é o volume molar em } \text{m}^3/\text{mol};$$

$$T \text{ temperatura do sistema em K; } T_C \text{ temperatura crítica em K})$$

A publicação do trabalho desse físico na Alemanha tem o nome de Roland, embora o mesmo tenha publicado tanto na Alemanha quanto na Hungria. Às vezes é conhecido por Roland, Barão de Eötvös, título húngaro chamado Vásárosnaményi Báro Eötvös Lóránd, ou Barão Eötvös de Vásárosnaményi, cidade húngara que faz fronteira com a Ucrânia, nos mapas atuais, segundo Connor e Robertson em 2006, pela Enciclopédia Britânica³.

Valores mais precisos da equação 2.6 foram obtidos **experimentalmente** por trabalho de químicos e esta equação passou a ser chamada de Lei Ramsey e Shields que a reorganizou para a equação.

$$\gamma V_m^{2/3} = C_E (T_C - T - 6) \quad \text{Eq. 2.7}$$

Observe que quando $T = T_C$ na equação 2.6 a tensão superficial anula-se, pois nessa temperatura a interface da superfície de tensão desaparece, porém, *experimentalmente*,

3. Disponível em: <<http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/Biographies/Eotvos.html>>. Acesso em 27 mar. de 2016.

não é o que ocorre; a ocorrência do fato de desaparecer o menisco (interface onde ocorre a tensão superficial, ou, a curvatura) está a temperatura T abaixo da temperatura crítica, ou $T = T_c - 6$. Daí ser a equação 2.7 de origem experimental e teórica, ser mais apropriada para compreender a dependência da tensão com a temperatura. O fato é que essa equação é parte do fenômeno de tensão superficial numa interface, embora não seja própria para argumentos de relacionar associação e dissociação de compostos químicos, que envolvem outros argumentos mais contundentes para essas ligações ou dissociações que não faz parte do contexto dessa análise física.

Outra análise física na interface da tensão superficial é a queda da gota de água de uma torneira. Inicialmente, a gota forma-se com massa M que vai se soltando da “boca” da torneira e neste processo a equação 2.2 faz valer sua aplicação, pois há a intensidade da força peso agindo sobre a massa da gota de água que deve se anular na forma vetorial (ação por toda superfície) com a tensão superficial, segundo Pilling, segundo lei do menor esforço ou princípio de mínima ação, já explicitado.

Experimentalmente, verifica-se que a gota não se rompe na superfície da “boca” da torneira ou tubo por onde está passando. Há um processo de contração da gota entre dois níveis de estiramento do estilete de água, e esse fato físico faz com que a massa m da gota despreendida seja menor que a massa M da gota ideal ($m < M$) e, esse fato acarreta o fator de contração f , conforme figura 2.2 que fornece subsídio para formação da Lei de Tate.



Fig. 2.2 Fotografia de uma gota de água caindo

Fonte: Pilling⁴.

Antes da massa de água se tornar esférica, percebe-se que um percentual de sua massa fica preso à superfície de tensão superficial. Isto pode ser comparado com as figuras 2.1 (desenhada) e 2.2 (com câmara de alta velocidade).

4. PILLING, Sérgio. Texto de Físico-Química Experimental. Prática 5, sobre tensão superficial, para alunos do Bacharelado e Engenharia Química da Universidade do Vale do Paraíba em São José dos Campos – SP, disponível em <http://www1.univap.br/spilling/FQE2/FQE2_Introducao,ementa.pdf>. Acesso em 24 mar.de 2016.

OS TRÊS ESTADOS DA MATÉRIA NA VISÃO CLÁSSICA DA FÍSICA

Observa-se que, além do objeto físico tensão, a questão da temperatura e da energia que se estabelecem na membrana tensional, dentre outras compreensões microscópicas devem ser esclarecidas, pois o contexto físico da tensão superficial que está conjugado com fluidos.

Nesse ambiente, de caracterização do fenômeno da tensão superficial exige uma compreensão dos estados da matéria, que na visão clássica; dos três estados físicos, eles podem ser compreendidos como, compostos de moléculas ou íons que oscilam em torno de ponto fixo médio para sólidos; enquanto que, nos líquidos e gases as moléculas não possuem ponto fixo médio de oscilação e, trocam de lugares num contínuo movimento aleatório, principalmente na natureza física dos gases.

Isso produz a *diferença* entre líquidos e gases que está na força de interação entre moléculas, que no caso dos líquidos, são mais fortes que no caso dos gases, por isso se compreende a questão de líquidos tomarem as formas dos recipientes que ocupam, enquanto que gases ocupam todo o volume finito, por terem expansão volumétrica como característica física de ocupação gasosa num volume finito. Outra diferença é que líquidos admitem superfícies livres, como líquidos em repouso num recipiente, enquanto gases não admitem tal propriedade física.

Essas características microscópicas explicam *outras diferenças* entre líquidos e gases, como o fato dos gases poderem ser comprimidos num volume finito, mas tal fato não é verdadeiro para líquidos; outra diferença, é que, se misturarmos água e óleo num recipiente, observa-se que a mistura não ocorre, e isto quer dizer que, na maioria das vezes a junção de líquidos não predomina a miscibilidade, enquanto que para gases isso é quase sempre verdadeiro. Exemplo: o ar que respiramos é composto de diversos gases, sendo o oxigênio, um deles.

Fazendo recorte para gases e líquidos, compreende-se que estes elementos físicos têm a *propriedade* de escoar ou fluir, e assim, *fluido é uma substância que pode escoar através de duto* (condutor), como no caso do sangue que flui em artérias, veias e capilares.

ELEMENTOS FÍSICOS E MATEMÁTICOS DA TENSÃO SUPERFICIAL.

A tensão superficial apresenta geometria característica de produzir curvaturas côncava ou convexa, no interior de recipientes, fazendo com que o mesmo abandone a característica de superfície plana. *Essas curvaturas são chamadas de menisco*. E para a ocorrência dessa geometrização existem fatores que influenciam na tensão superficial:

1. Natureza química dos materiais: interface entre dois líquidos depende da assimetria das fases entre esses líquidos.

2. Temperatura, como já fora explicitado.
3. A interface entre as duas substâncias e sua interação físico-química.
4. Interações moleculares ocorrem com forças que as mantêm coesas, ou forças de coesão; tipo de Van der Waals ou pontes de hidrogênio.
5. As forças atrativas intermoleculares são dependentes da distância entre moléculas e são desprezíveis quando a distância é da ordem de 10 Å. Isto quer dizer que o campo de ação física dessas forças está limitado ao que se chama de alcance molecular.
6. Daí a presença de solutos, com moléculas polares que aumentam a tensão superficial da água (álcool) e moléculas não polares diminuem (detergente).
7. O conceito de tensão superficial foi associado à Energia Livre de Gibbs, e não será abordada aqui⁵, que é uma componente da termodinâmica.
8. Outra componente termodinâmica na perspectiva de tensão superficial são os efeitos de concentrações em solução usadas para descrever a superfície de excesso, também estudada por Gibbs⁶.

Esses fatores conduzem as consequências físicas que se assentam na construção física e na linguagem Matemática sobre tensão superficial, conforme será apresentado.

Tensão Superficial: representação Matemática

Objetos, como agulha ou um clipe para agrupar papéis, podem flutuar na superfície da água. Fisicamente, a pequena ação da intensidade da força peso do objeto é igual a ação da tensão superficial do referido objeto que flutua na água mesmo que a densidade da agulha ou do clipe seja maior que a densidade da água. Essa é uma experiência que alguém já a fez na vida por curiosidade, se nunca fez esse é o momento de tentar fazer.

A tensão superficial é *definida* como ação de forças tangenciais que resultam da interação das forças moleculares interiores e na superfície do líquido, cuja resultante é uma força de intensidade que age num ponto perpendicular a uma distância L , longitudinal do plano da superfície. Sendo assim, a tensão superficial é para *qualquer líquido*, representada matematicamente por:

$$\gamma = \frac{F}{L} \quad \text{Eq. 2.8}$$

Essa compreensão pode ser vista na figura 2.3 onde se observa a agulha sobre a superfície da água, num corte vertical, e as forças superficiais F_s , nela contida.

5. Isto porque o contexto deste livro é para o Ensino Médio e, este tema exige um condicionamento matemático não condizente para com o referido nível de ensino.

6. Desenvolver um texto sobre a vida e obra de Gibbs, com o objetivo de conhecer aspectos elementares que envolvem a termodinâmica.

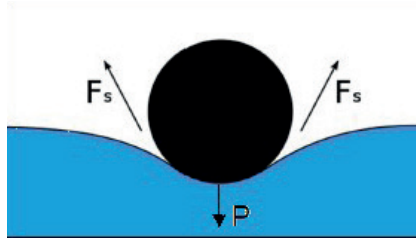


Fig. 2.3 Visão da agulha num corte vertical.

<https://en.wikipedia.org/wiki/Surface_tension>.

Ou seja, forças tangenciais de superfícies com intensidade F_s e a força tangencial de origem do peso da agulha sob a água, de intensidade P , mantém o *equilíbrio* físico. Isso mostra a visão de forças tangenciais sobre ação numa superfície tensionada, num sistema em equilíbrio estático.

Fisicamente, a tensão superficial exprime força por unidade de comprimento necessária para manter o perímetro da superfície (fechado) que envolve a substância e, assim, essa força age tangencialmente à superfície e perpendicularmente ao perímetro da superfície, segundo Okuno (1982).

Tensão superficial e trabalho realizado sobre a superfície

Observe a equação 2.1, tratada como *força efetiva*, que, quando aplicada num ponto perpendicular ao comprimento L , ou semelhante ao caso da agulha onde as componentes verticais de F_s e a força peso, retratam ter significado físico idêntico, a partir da condição de equilíbrio estático que leva a $F \equiv P$; mostra-se a partir dessa condição de força efetiva, que, ao mesmo tempo, nesse contexto dinâmico, está a questão da energia, na concepção de trabalho de uma força física, dada por energia por unidade de área, como se segue.

$$\gamma = \frac{P}{L} = \frac{mgL}{L^2} = \frac{W}{A}$$

$$\gamma = \frac{F}{L} = \frac{FxL}{L^2} = \frac{W}{A}$$

De modo geral

$$\gamma = \frac{W}{A} \quad \Rightarrow \quad W = \gamma A \quad Eq. 2.9$$

Isto diz que, dada uma superfície, há ação da força sobre o comprimento longitudinal L dessa superfície, produzindo energia potencial por unidade de área que corresponde ao trabalho realizado pela força de modo a produzir a configuração *superficial mínima*, numa

temperatura constante, fato que possibilita realizar variação de trabalho motor (positivo) ou resistente (negativo), sobre a superfície, ou seja, no momento de formação do menisco.

Tensão superficial para líquidos puros

Outro conceito que se atrela ao de tensão superficial, já referendado anteriormente, compreende ação de forças moleculares que conduzem a superfície do líquido serem mínima e gerar um trabalho, num processo isotérmico (e isobárico) que pode ser reversível, para aumentar a superfície em uma unidade de área, ou seja, a tensão superficial é a energia livre (energia que pode ser usada para realizar trabalho) superficial. Daí a compreensão dada por Gibbs,

$$\gamma = \left(\frac{dG}{dA} \right)_{n, p, T} \quad \text{Eg. 2.10}$$

Onde γ é a tensão superficial; G é a energia livre de Gibbs, medida em Joules; A é a área, medida em m^2 ; n é o número de moles (constantes) na amostra; p é a pressão (constante) e T é a temperatura (constante); sendo assim, a unidade de tensão superficial é J/m^2 . Porém vale ressaltar que esta aplicação só é validada para *líquidos puros*, nas Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP). Essa compreensão Física reporta ao fato de que os estudos da Tensão Superficial, também, estão inseridos no contexto da Termodinâmica, embora no contexto desse livro que é para o Ensino Médio, isso fica como informação já que a matemática inserida no contexto não faz parte desse nível de ensino.

Tensão superficial e o alcance molecular

A força de atração entre moléculas num líquido tem comportamentos que diferem do fato destas moléculas estarem dentro ou na superfície. Considere a figura 2.4, onde há uma situação de três posições possíveis e diferentes de uma molécula ocuparem num líquido.

A primeira posição, lado esquerdo da figura 2.4 a molécula se encontra no interior do líquido e, nessa situação a força atrativa resultante sobre ela é nula.

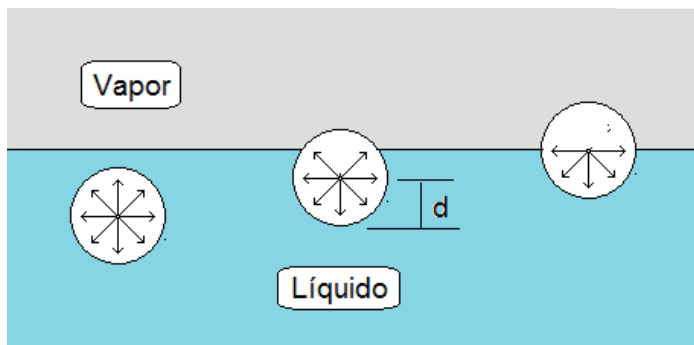


Fig. 2.4 Posição relativa de moléculas num líquido

<<http://coral.ufsm.br/gef/Fluidos/fluidos20.pdf>>.

Na posição mais ao centro, a molécula se encontra numa posição menor que a distância d , aproximadamente $1,0 \text{ nm}$ (10^{-9} m) e, nessa situação a resultante de forças sobre esta molécula não é nula; há mais moléculas do líquido na porção limitada pela distância d , que na porção menor para atingir a superfície; nesse caso, há componente resultante, de força apontando para baixo.

Na posição do lado direito se encontra uma molécula na superfície, nesse caso a força resultante é diferente de zero, porém, diferente da molécula central, que tem resultante da soma vetorial de componentes resultantes no eixo vertical, esta tem resultante máxima, apontando para baixo, pois não tem outras componentes de forças na linha vertical, ou seja, a soma vetorial aponta toda para baixo.

Fisicamente, a variação de trabalho realizado para que a superfície diminua, promove o deslocamento molecular que se dar para o interior do líquido, e assim, a energia associada à realização desse trabalho é positiva. Isso ocorre no menisco de forma côncava. Enquanto que, a variação de trabalho é realizada para a superfície aumentar, o deslocamento molecular ocorre no sentido do interior do para a superfície do líquido, e assim a energia associada à realização desse trabalho é negativa. Isso ocorre para o menisco na forma convexa.

Dessa forma a variação do trabalho realizado por forças moleculares, por unidade de área, deve explicitar a física da tensão superficial no líquido; tomando essa energia como sendo necessária para diminuir a superfície, $A_F < A_I$ (positiva) e negativa para aumentar, $A_F > A_I$ (trabalho resistente) a superfície, compreendendo então o significado físico de tensão superficial na linguagem energética, explicitada a partir da equação 2.9, como sendo:

$$\Delta W = -\gamma \Delta A \quad \text{Eq. 2.11}$$

Isso porque, no caso da força ter resultante voltada para baixo a área final é menor que a área inicial e assim a variação de área será negativa, pois $A_F < A_i$ logo $A_F - A_i < 0$ ou $\Delta A < 0$, o que leva a se ter a variação de trabalho positiva ou trabalho motor, para o caso do menisco na forma convexa e, caso contrário, a variação de área é positiva, pois $A_F > A_i$ logo $A_F - A_i > 0$ ou $\Delta A > 0$, implicando variação de trabalho negativa, ou trabalho resistente, que é para o caso do menisco na forma côncava.

Fisicamente isso quer dizer que, para dada superfície, há força efetiva capaz de realizar um trabalho de modo a aumentar esta superfície até um limite muito próximo de seu rompimento; esta mudança de configuração superficial é a energia potencial “gasta” na forma de *variação do trabalho* realizado pela força efetiva ou tensão superficial, daí sua compreensão de valor negativo, explicitado pela equação 2.11.

Fato físico que dá notoriedade a tensão superficial não é isolado, mas, está ligado ao conceito de pressão na formação dessas superfícies, como veremos mais tarde.

Lei de Tate

A Lei de Tate é uma aplicação para medir a tensão superficial em líquidos. Também conhecida como Método do Peso da Gota. Observe a figura 2.5 que exprime o princípio dessa ideia. A análise Física é a de que a gota se forma com um diâmetro AB, mas à medida que vai se desprendendo há um afunilamento do diâmetro (CD), conforme a figura citada

Mas, supondo que *não* haja o afunilamento, o peso da gota deve se igualar com a força de tensão em AB.

$$\sum F_y = 0 \quad \therefore \quad F_y - P = 0 \quad \therefore \quad F_y = P$$

$$\text{Como } \gamma = \frac{F}{L} \quad \therefore \quad F_y = \gamma L \quad \text{onde } L = 2\pi r \quad \therefore \quad F_y = \gamma(2\pi r)$$

$$\text{Sendo assim } \gamma(2\pi r) = P \quad \text{ou} \quad \gamma(2\pi r) = Mg$$

$$\gamma = \frac{Mg}{2\pi r} \quad \text{Eq. 2.12}$$

Esse fato vale para a gota ideal. Mas, fisicamente, a massa M da gota ideal, não é totalmente desprendida de todo. Há resíduo de massa que se prende ao todo.

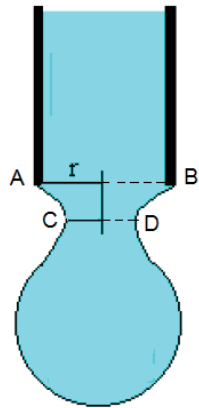


Fig. 2.5 Peso da gota de água

Logo, a massa m da gota despreendida é menor que M por um fator f positivo e menor que a unidade e maior que zero.

$$M > m \quad \therefore \quad Mf = m \quad \therefore \quad M = \frac{m}{f} \quad \text{sendo} \quad 0 < f < 1$$

Dessa forma a equação 2.12 se torna:

$$\gamma = \frac{mg}{f(2\pi r)} \quad \text{Eq. 2.13}$$

Na análise dessa equação 2.13 pode-se dizer que o fator f tem dependência com o raio do tubo e com o volume da gota e, sabendo do fato físico de que líquidos se dilatam, evidentemente que este fator deve ter uma dependência com a temperatura, segundo Pilling (s/d). Experimentalmente, medir a massa de apenas uma gota pode produzir erros de medidas consideráveis, para minimizar esse efeito mede-se a massa de n gotas.

A força peso da agulha sobre superfície de água

Traçando a visão da figura 2.3, para a agulha de comprimento L , submetida a duas forças superficiais F_s fazendo um ângulo θ com a vertical e a força peso. Isso pode ser visto na figura 2.6. Onde no eixo x não há contribuição Física da resultante de forças.

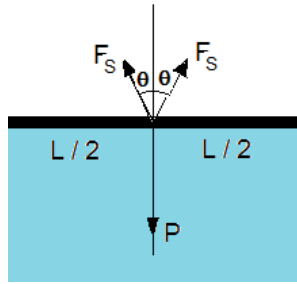


Fig. 2.6 Forças tangenciais na superfície da água agindo sobre uma agulha

Como a força superficial F_s tem mesma intensidade, logo suas componentes nos eixos x e y serão idênticas:

$$\text{Eixo } x \quad F_{S(x)} = F_s \sin \theta \quad \text{Eixo } y \quad F_{S(y)} = F_s \cos \theta$$

$$\sum F_x = 0 \quad \therefore \quad F_s \sin \theta - F_s \sin \theta = 0$$

$$\sum F_y = 0 \quad \therefore \quad F_s \cos \theta + F_s \cos \theta - P = 0$$

$$P = 2F_s \cos \theta \quad \text{como } \gamma = \frac{F_s}{L} \quad \text{logo } F_s = \gamma L$$

$$P = 2\gamma L \cos \theta \quad \text{Eq. 2.14}$$

Inseto sobre a superfície de água

Outra consequência da tensão superficial da água é o passeio de pequenos insetos na superfície, fato da aplicação de Física na Biologia. Sendo assim, qual é então a condição Física para que isso ocorra?

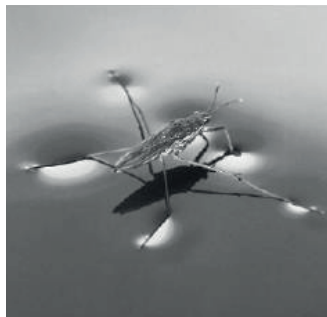


Fig. 2.7 Inseto sobre a superfície da água

<<http://dragon.unideb.hu/~kolloid/colloid/lectures/chembsc/lecture%2003.pdf>>.

Suponha um inseto com n pernas, em *repouso* sobre a água. Mas, para a análise física, considera-se apenas uma pata do inseto sobre o líquido, conforme figura 2.8.

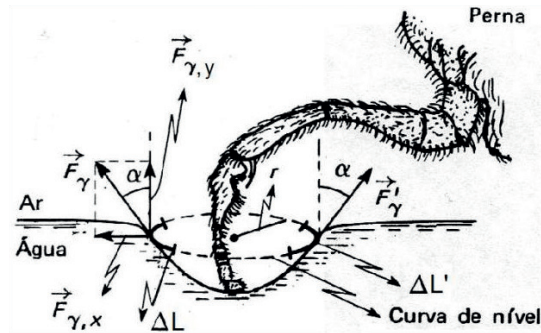


Fig. 2.8 Perna de um inseto sustentado pela tensão superficial da água
OKUNO (1982, p.329).

A força F_γ tem ação em cada ponto da superfície do líquido depressionada e é tangencial a esta superfície e perpendicular a cada curva de nível, que passa no ponto de interesse. Esse é o caso em que o inseto exerce movimento promovido por ação biológica. Observe a figura 2.9 que, as componentes horizontais da força de tensão se anulam, enquanto que as componentes verticais (eixo y), de mesmo sentido e direção somam-se, promovendo a resultante R , no eixo y, de forças que atua sobre o comprimento ΔL .

Isto porque o inseto está sendo considerado em repouso (equilíbrio). Assim, no caso de haver movimento em certa direção, o procedimento físico é não considerar a força \vec{F}'_γ , fato que leva a se ter componente no eixo x, na direção e sentido do movimento do inseto.

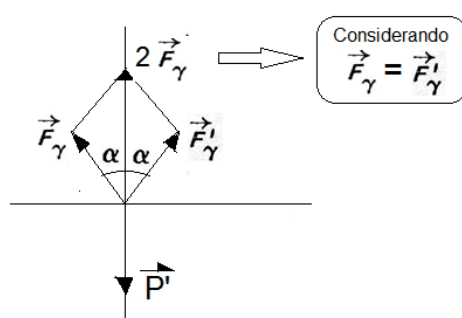


Fig. 2.9 Resultante de forças no eixo vertical

$$\sum F_y = 0 \quad \text{leva a} \quad P' = R_y \quad \text{Eq. 2.15}$$

Onde P' é o peso de uma pata do inseto. Para duas patas o peso será $2P'$ e, para n patas o peso será nP' . Ou seja:

$$nP' = P \quad \text{ou} \quad P' = \frac{P}{n} \quad \text{enquanto} \quad R_y = 2F_{y,y} \quad (\text{no equilíbrio})$$

$$\text{De 2.15 tem-se} \quad \frac{P}{n} = 2(F_y \cos \alpha) \quad \text{ou} \quad \frac{P}{n} = 2(\gamma \Delta L) \cos \alpha$$

$$\frac{P}{n} = 2[\gamma(2\pi r)] \cos \alpha \quad \text{ou} \quad \frac{P}{n} = 4\pi\gamma(r \cos \alpha)$$

$$P = (4\pi r)n(r \cos \alpha)$$

A condição Física para que o inseto fique apoiado e, *em repouso*, sobre a película da água que tem tensão superficial F_y é estabelecida pela relação entre o raio r da curva de nível e a inclinação da superfície do líquido ao longo dessa curva, segundo Okuno (1982, p. 329). E, desse modo:

$$r \cos \alpha = \frac{P}{n(4\pi\gamma)} \quad \text{Eq. 2.16}$$

Exemplo

Encontre o ângulo para um pequeno inseto de 6 patas com massa de 0,05 g e raio da curva de nível, promovido pelo pouso da pata é de 0,15 mm, sobre a superfície da água de tensão superficial igual a $73 \times 10^{-3} \text{ N/m}^2$ e $g = 9,80 \text{ m/s}^2$.

$$\cos \alpha = \frac{1}{r} \frac{mg}{n(4\pi\gamma)} = \frac{1}{1,5 \times 10^{-4}} \frac{5,0 \times 10^{-5} \times 9,80}{6 \times 4 \times 3,14 \times 7,3 \times 10^{-2}}$$

$$\cos \alpha = 0.59 \quad \Rightarrow \quad \alpha = 53,8$$

A *condição física* para que um inseto de 6 patas com massa de 0,05 g pouse sobre a superfície da água e, nessa condição, abrir uma curva de nível de raio igual a 15 mm é dada por $r \cos \alpha = 1,5 \times 10^{-4} \times 0,59 = 0,0885 \text{ mm}$. Observe que o pouso do inseto não é feito com a ponta das patas, mas com a pata como toda, daí o tratamento ser semelhante ao caso da agulha, *em equilíbrio*.

A variação de pressão e a forma dos meniscos

Foi compreendido até o momento a concepção Física de fluido como a capacidade de escoar, ou seja, o conjunto de moléculas de um líquido pode se mover uma com relação às outras e todas numa determinada direção do fluir de escoamento do líquido, mesmo que o desequilíbrio para tal escoamento seja de ação mínima possível.

Essa compreensão faz ver que fluidos possuem elasticidade. Ou seja, se diminuir a pressão o fluido tende aumentar o volume. Isto revela a grandeza física *compressibilidade*.

Ou que, líquidos possuem um limite de compressibilidade e, isto quer dizer que sobre ação da pressão esse volume diminui, embora a massa do líquido seja a mesma pela Lei de Conservação das Massas, mas sua massa específica (ρ) aumenta devido à diminuição do volume. Essa variação de volume é infinitesimal. Essa capacidade de elasticidade é fisicamente conhecida como parâmetro que descreve essa situação, chamado de Módulo Volumétrico, definido como:

$$K \equiv -V \frac{\Delta p}{\Delta V} \quad \text{Eq. 2.17}$$

Observe que K ou Módulo Volumétrico é uma grandeza positiva e expressa o fisicamente a compreensão de empacotamento da matéria. Na relação variação de pressão e variação de volume, mostra-se que o Módulo Volumétrico é positivo.

Pois:

$$\begin{aligned} \Delta p < 0 &\Rightarrow p - p_0 < 0 \Rightarrow p_0 > p \\ \Delta V > 0 &\Rightarrow V - V_0 > 0 \Rightarrow V_0 < V \end{aligned}$$

E que

$$\begin{aligned} \Delta p > 0 &\Rightarrow p - p_0 > 0 \Rightarrow p_0 < p \\ \Delta V < 0 &\Rightarrow V - V_0 < 0 \Rightarrow V_0 > V \end{aligned}$$

Essa propriedade era conhecida para gases, mas em 1850 Marcellin Pierre Eugène **Berthlot**⁷ (1827–1907), segundo Gomes⁸ (s/d), conferiu esta propriedade aos líquidos.

Em seus trabalhos a concepção fundamental que lhes norteou foi a de que todo fenômeno químico depende da ação de forças físicas as quais podem ser medidas e, determinadas⁹. O que lhes confere o grau de físico-químico. Ele toma o inverso da equação anterior e apresenta na forma:

$$\frac{1}{K} = -\frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta p} \quad \text{ou} \quad -\frac{1}{K} V \Delta p = \Delta V$$

7. Químico francês.

8. <<http://www.ufjf.br/engsanitariaeambiental/files/2012/09/Apostila-de-Mec%C3%A2nica-dos-Fluidos.pdf>>. Acesso em 24 mar. de 2016.

9. <https://pt.wikipedia.org/wiki/Marcellin_Berthlot>. Acesso em 03 abr. de 2016.

Nessa condição o Módulo Volumétrico é chamado de Módulo de Elasticidade K e, tem-se que a variação de volume ocorre quando se dá variação de pressão.

$$\Delta V = - \frac{1}{E} V \Delta p \quad Eq. 2.18$$

Essas análises físicas revelam que, quando a variação de pressão é menor que zero ($h > 0$) a variação de volume cresce, num tubo fino, de diâmetro d da ordem de milímetros. Isto leva a variação de trabalho negativa ou resistente. Ou seja, a superfície tensionada não quebra. Nesse caso, forma a superfície livre chamada de menisco, que nessas condições tem a forma geométrica côncava.

Em caso contrário ($h < 0$), a variação de pressão é positiva a que conduz a variação de volume negativo, que promove variação de trabalho positiva (motor). A superfície livre, nestas condições tem forma geométrica convexa, ver figura 2.10.

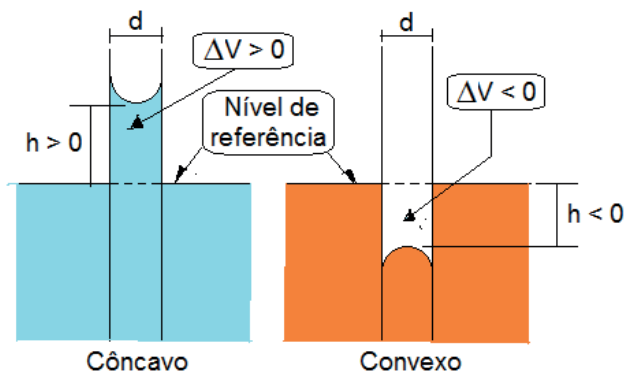


Fig. 2.10 Características Físicas e Matemática na formação de meniscos

A relação com h , vem do contexto em que:

$$\Delta p = p - p_0 \quad e \quad que \quad \Delta p = - \rho g h \quad Eq. 2.19$$

E daí a compreensão $h < 0$ ter-se $\Delta p > 0$ e no caso contrário $h > 0$ ter-se $\Delta p < 0$.

Lei de Laplace

É fato que ao se encher um balão de festa e depois soltá-lo percebe-se que o mesmo fica a rodopiar no ambiente enquanto se esvazia. O rodopiar do balão se deve aos efeitos de movimento do ar no ambiente, enquanto o esvaziamento do mesmo está ligado ao fato de que a pressão interna dele é maior que a pressão atmosférica e, vai se

expelindo o ar para que a pressão interna se iguale a externa, pois o ar está comprimido, efeito semelhante quando um pneu de carro estoura, ou melhora falando, quando o uso do mesmo é prolongado e a borracha que o protege se desqualifica para tal finalidade, como um dos princípios, pois um material contundente e perfurante também tem essa capacidade de estourar pneus. e acontece um barulho pelo deslocamento de ar, promovendo o som, com muita intensidade, devido a pressão interna do pneu ser bem maior que a pressão externa. A razão Física para que haja pressão interna maior que a externa no balão é que no processo de enchimento do balão a membrana elástica sofre distensão e, no momento em que o balão é solto (aberto) a membrana elástica tenta contrair-se ou voltar ao seu estado inicial. O balão tem pressão interna maior que a pressão do ar que está a enchê-lo.

Agora, considera-se uma bolha de sabão esférica contendo duas superfícies (interna e externa) e fina camada de líquido entre elas. Quem já brincou de fazer bolinhas de sabão percebe este fato experimental.



Fig. 2.11 Uma bolha de sabão flutuando com reflexão das nuvens

<<http://www.cns.gatech.edu/~predrag/courses/PHYS-4421-13/Lautrup/surface.pdf>>.

De forma semelhante ao balão de festa, na bolha de sabão, a pressão interna é maior que a externa. Agora se cria um *modelo físico* para compreender este fato.

Primeiro: vamos supor que não haja pressão externa, denominada de p_0 logo, $p_0 = 0$. Sendo assim, a bolha de sabão se torna estacionária.

Segundo: corta-se ao meio a referida bolha estacionário, que pôr está nessa condição física, não possui movimento (está em repouso); assim, cada metade está com aceleração nula e vale a Lei de Equilíbrio Estático,

$$\sum \vec{F} = 0$$

Fisicamente, sabe-se que existe a força resultante apontando para esquerda devido à tensão superficial e a força resultante apontando para direita devido a diferença de

pressão na área da bolha de sabão (área projetada). Ver figura 2.12.

A força devido à tensão superficial é o produto de γ pelo comprimento da circunferência de raio R , que é $2\pi R$. Como há duas superfícies (interior e exterior), então a resultante será o dobro de $\gamma(2\pi R)$. Este resultado aponta para esquerda, logo a resultante de forças no lado esquerdo é $-2[\gamma(2\pi R)] = -4\pi\gamma R$.

Outro fato físico nesse modelo é assumir que as películas são tão finas que *seus raios podem ser considerados idênticos*. E que a pressão no interior da *bolha* de sabão age perpendicularmente em cada ponto da superfície e, dessa forma a força resultante é o produto da variação de pressão pela área da superfície (πR^2). Ou seja, $+\Delta p(\pi R^2)$.

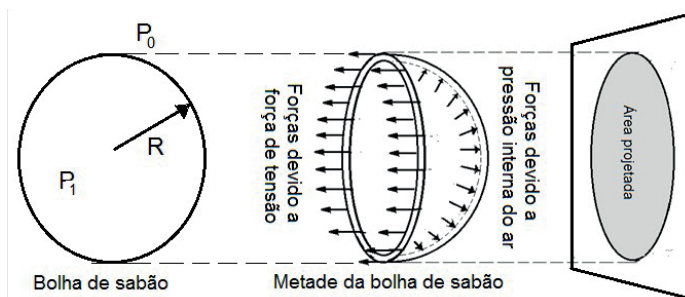


Fig. 2.12 Esquema para desenvolver a Lei de Laplace

Trabalhando estas expressões na condição de equilíbrio estático, tem-se que.

$$-4\pi\gamma R + \Delta p(\pi R^2) = 0 \quad \text{ou} \quad \Delta p(\pi R^2) = 4\pi\gamma R$$

$$\Delta p = \frac{4\gamma}{R} \quad \text{Eq. 2.20}$$

No caso da *gota líquida*, onde só há uma película, tem-se a força devido à tensão superficial é dada pela equação $F = \gamma L$, com $L = 2\pi R$; dessa forma $F = 2\pi R\gamma$.

Semelhantemente, a força devido à variação de pressão é dada por $F = (\Delta p) \cdot A$, onde A é a área projetada ou $A = \pi R^2$ daí $F = (\Delta p)\pi R^2$. Como essas forças são iguais:

$$\Delta p(\pi R^2) = 2\pi R\gamma \quad \Rightarrow \quad \Delta p = \frac{2\pi R\gamma}{\pi R^2}$$

$$\Delta p = \frac{2\gamma}{R} \quad \text{Eq. 2.21}$$

Essas equações (2.20 e 2.21) afirmam que a pressão monométrica¹⁰ dentro de um balão ou membrana elástica é diretamente proporcional a tensão superficial da membrana

10. Diferença de pressão entre o interior e exterior de um balão, ou membrana elástica.

e inversamente proporcional ao raio de curvatura da referida membrana.

Compreende-se que, a pressão atmosférica (fora do balão) é constante e, dentro do balão está em equilíbrio, logo a pressão manométrica é constante. Como a tensão superficial é constante, de imediato se observa que o raio de curvatura é constante também. Logo, se $R = \text{constante}$, então a configuração da bolha de sabão é uma esfera de raio R , conforme diz Silveira e Levin (2004).

Da lei de Laplace¹¹ decorre que, sendo constante a tensão superficial, a pressão manométrica diminui conforme aumenta o raio de curvatura da membrana. Em bolhas de sabão, por exemplo, a tensão superficial da mistura de água com sabão é uma propriedade exclusiva dessa mistura: independe do raio e, portanto, do volume da bolha. Desta forma, quanto maior é o raio da bolha de sabão, tanto menor é a pressão manométrica no seu interior. Logo que duas bolhas de sabão aderem uma na outra, e se interconectam permitindo a passagem de ar entre elas, a bolha menor se esvazia e a grande infla. A soma dos volumes iniciais das duas bolhas é menor do que o volume da bolha única que se forma no final;

Os autores ainda apresentam duas explicações práticas. Primeira: Esse resultado é contra intuitivo, pois as pessoas costumam pensar que quanto maior for a bolha, tanto maior deveria ser a pressão no interior dela. Segunda: Quando produzimos espuma em um balde, agitando água com sabão, pode-se notar que, depois de cessada a agitação, o volume da espuma continua crescendo. O crescimento do volume da espuma é explicado pela não conservação (aumento) do volume total das bolhas que se interconectam.

Exemplo:

Uma bolha de ar tem diâmetro igual a 1,0 mm, quando ela está 0,5 m abaixo da superfície da água que tem tensão superficial de $73 \times 10^{-3} \text{ N/m}$. Calcule a *pressão de calibre* dentro da bolha ($\Delta p' = p_d - p_o$), com p_d pressão dentro da bolha

$$\Delta p = \frac{2\gamma}{R} = \frac{2 \times 73 \times 10^{-3}}{(1/2) \times 10^{-3}} = 292 \text{ Pa}$$

$$\Delta p = p_d - p_{\text{água}} \quad \text{ou} \quad p_d - p_{\text{água}} = 292$$

$$\text{Mas } p_{\text{água}} = \rho gh + p_o \quad \therefore \quad p_d - (\rho gh + p_o) = 292$$

$$p_d - p_o - \rho gh = 292 \quad \text{ou} \quad p_d - p_o = \rho gh + 292$$

$$\text{Usando } \Delta p' = p_d - p_o$$

$$\Delta p' = 1,0 \times 10^3 \times 9,80 \times 0,5 + 292 = 5,2 \times 10^3 \text{ Pa.}$$

11. Ver o trabalho. "Pressão e Volume em Balões de Festa: podemos confiar em nossa intuição?" disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/~levin/Pdfs.dir/Baloes.pdf>>. Acesso em 31 de jan. de 2016. Está publicado no Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 21, n. 3: p. 285-295, dez. 2004.

Para situações onde a membrana elástica não é uniforme em sua elasticidade tem-se superfície que não são perfeitamente esféricas e, mesmo assim, a equação de Laplace é ainda aplicável, atribuindo a R um valor em cada ponto derivados dos raios de curvaturas de duas secções normais à superfície e perpendiculares entre si, segundo Hunter, 1986 (*Apud FERREIRA, s/d*)¹². Tem-se, nesse caso que:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad \text{Eq. 2.22}$$

O que leva a equação de Laplace para:

$$\Delta p = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad \text{Eq. 2.23}$$

Daí que a equação 2.23 se torna idêntica a 2.21 quando ocorrer $R_1 = R_2 = R$.

A mesma dependência proporcional da variação da pressão com a tensão superficial e o raio, vale para a geometria do cilindro de comprimento L e raio R, que pode ser comparado a um vaso sanguíneo, a parede do cilindro (artéria) fornece uma pressão para dentro e o líquido (sangue, por exemplo) fornece uma pressão para fora.

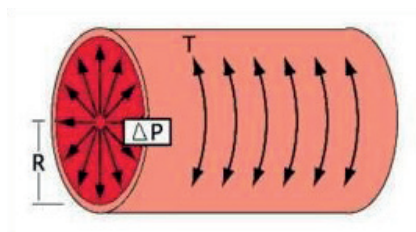


Fig. 2.13 Figura da tensão superficial num cilindro

<<http://www.insula.com.au/physics/1279/L8.html>>.

Conhecendo que:

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{W}{A} \rightarrow \gamma = \frac{dW}{dA} \quad \text{onde} \quad dW = \Delta p \cdot dV \\ \gamma &= \frac{\Delta p \cdot dV}{dA} = \Delta p \frac{dV}{dA} = \Delta p \frac{dV/dR}{dA/dR} \\ V &= \pi R^2 L \quad \therefore \quad \frac{dV}{dR} = 2\pi RL \quad e \quad A = 2\pi RL \quad \therefore \quad \frac{dA}{dR} = 2\pi L \\ \gamma &= \Delta p \frac{2\pi RL}{2\pi L} \quad \text{ou} \quad \gamma = (\Delta p)R \\ \Delta p &= \frac{\gamma}{R} \quad \text{Eq. 2.24} \end{aligned}$$

12. Disponível em: <<http://www.spq.pt/magazines/BSPQ/618/article/30001960/pdf>>. Acesso em 15 de abr. de 2016.

Entende-se assim que a dinâmica da tensão superficial contribui para muitos fenômenos que se estabelecem em interfaces. Ela é um fenômeno natural que pode ser associada às pequenas ondulações superficiais formadas no líquido, segundo¹³, Thurey, Wojtan, Gross e Turk (s/d). Daí a importância do conhecimento de tensão superficial.

PARA DESCONTRAIR:

[UFJF – 2014] A maior parte dos seres vivos é constituída por água, responsável por 70 a 85% de sua massa. Considere as afirmativas abaixo relacionadas às propriedades físico-químicas da água.

- I. A molécula de água é polarizada, ou seja, apesar de ter carga elétrica total igual a zero, possui carga elétrica parcial negativa na região do oxigênio e carga elétrica parcial positiva na região de cada hidrogênio.
- II. Na água em estado líquido, a atração entre moléculas vizinhas cria uma espécie de rede fluida, em contínuo rearranjo, com pontes de hidrogênio se formando e se rompendo a todo momento.
- III. A tensão superficial está presente nas gotas de água, sendo responsável pela forma peculiar que elas possuem.
- IV. O calor específico é definido como a quantidade de calor absorvida durante a vaporização de uma substância em seu ponto de ebulição.

Assinale a alternativa que contenha todas as afirmativas CORRETAS.

- a) I e III.
- b) II e IV.
- c) I, II e III.
- d) I, II e IV
- e) I, III e IV

Resposta – c

13. Disponível em: <http://pub.ist.ac.at/group_wojtan/projects/surface_tension/surface_tension.pdf>. Acesso em 16 abr. de 2016.

CAPILARIDADE

No senso comum, provavelmente por propaganda midiática, quando se fala de capilaridade algumas pessoas lembram-se de imediato de cabelo, já que existem propagandas com termo do tipo “o seu cabelo são vasos capilares” ou “perda capilar terá fim com uso do produto x”, referindo-se a queda do cabelo. Embora, a palavra latina *capillus* é que origina o significado de cabelo, ela possui outros significados como tubo de espessura muito fina, com diâmetro na ordem de micro, usado no contexto da biologia ou medicina como vasos capilares.

Realmente, o fio de cabelo é um vaso capilar, que pode ser visto na figura 3.1, como composto de três partes: camadas externas chamadas de cutículas, o córtex, parte intermediária entre cutículas e a medula, parte central do fio de cabelo. Observa-se assim que a estrutura capilar é problema dermatológico, pois o fio de cabelo é um duto (condutor) para a epiderme, onde ele nasce, sendo assim, problemas dessa natureza (seborreia, calvície, queda), deve-se consultar um dermatologista.

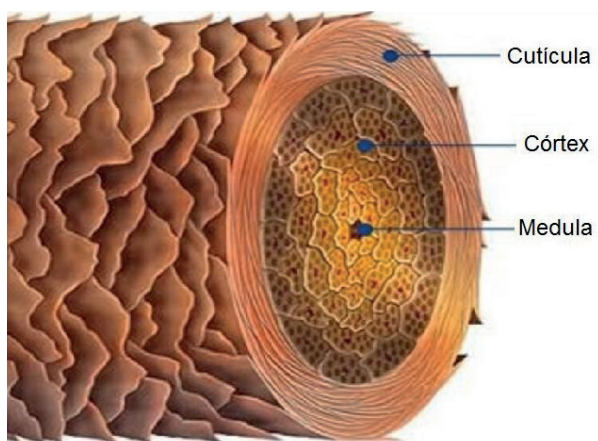


Fig. 3.1 Figura da estrutura de um fio de cabelo

<<http://artistasdocabelo.com.br/autor/admin/page/2/>>.

Mas, na compreensão física, como entender a capilaridade? Já se tem ideia de se tratar de um fenômeno que ocorre em tubos capilares, como o cabelo. E, nesse contexto tem-se a compreensão desse fenômeno no que diz respeito ao que se chama de ação capilar ou capacidade que tem o líquido (dentro do tubo de pequeno diâmetro) em subir ou descer, como foi tratado no item sobre variação de pressão e forma do menisco. Esta característica tem a ver com forças de coesão e de adesão, que são forças de curto alcance.

O estudo sobre tensão superficial até o momento descrito revelou interesse particular

do fenômeno de superfície relativo à interface entre líquido e gás, como a superfície da água e atmosfera. Embora se saiba que há outras possíveis separações entre dois meios distintos.

Assim, podem-se ter separações do tipo líquido e parede sólida (vidro, prata) ou entre líquido e vapor, além da separação líquido gás ou líquido vapor, como se ver na figura 3.2, onde o significado de película é compreendido como finíssima camada de algumas moléculas.

Fica evidente que cada película sofre tensão superficial. Para descrever estas tensões, primeiro se estabelece a nomenclatura entre superfícies: sólido – líquido por SL; sólido – vapor por SV e líquido – vapor por LV.

Nesse sentido, Sears & Zemansky (1970, p. 285), apresenta uma notação para a tensão superficial entre as superfícies denotadas, por:

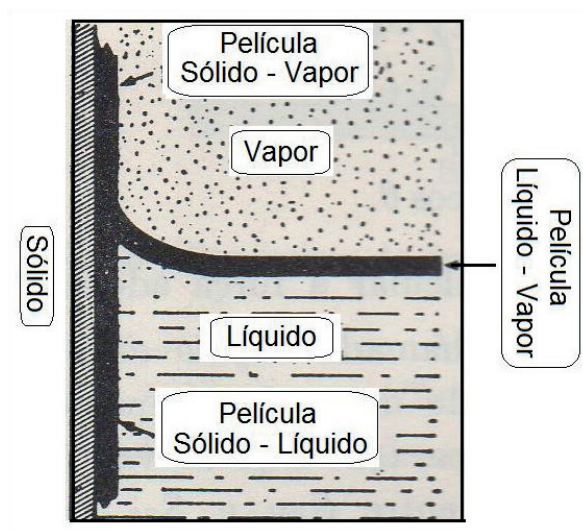


Fig. 3.2 Diferentes separações físicas entre sólido, líquido e vapor.

Sears & Zemansky, vol. 1 (1970, p.285)

Onde:

γ_{SL} = tensão superficial da película sólido – líquido

γ_{SV} = tensão superficial da película sólido – vapor

γ_{LV} = tensão superficial da película líquido – vapor.

Vê-se assim que, a curvatura da superfície do líquido junto à parede, (sólida) tem a ver com a diferença entre as tensões superficiais γ_{SV} e γ_{SL} .

Anteriormente fora visto que a curvatura tinha haver com o objeto físico da diferença de pressão, mas agora se vê outro componente físico pertinente à curva que o líquido faz junto a uma parede sólida, como se ver na figura 3.3, onde há diferentes paredes junto a diferentes líquidos.

Observa-se nessa referida figura que, água, num recipiente de parede de prata não tem curva e, nesse caso $\gamma_{SV} = \gamma_{SL}$, logo a curvatura acontece se $\gamma_{SV} \neq \gamma_{SL}$, como no caso do iodeto de metileno e o mercúrio, ambos num recipiente de vidro.

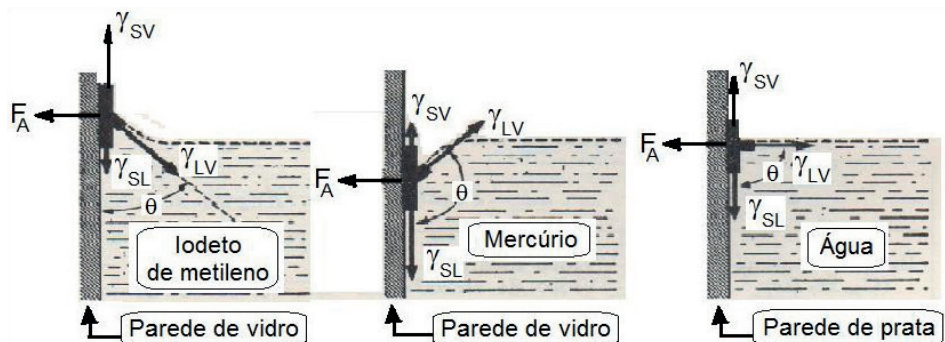


Fig. 3.3 Curvaturas de líquidos em paredes sólidas

Sears & Zemansky, vol. 1 (1970, p. 285).

Olhando o estado de equilíbrio físico, apresentado na figura 3.3, nota-se que há um conjunto de quatro forças, sendo três delas referentes a tensão superficial e a quarta força é a denominada força de adesão (F_A).

Como já citado que a capilaridade é um fenômeno que está, também, ligado as forças de adesão e coesão, assim, se a força de adesão for maior que o força de coesão à superfície perto da parede do vidro é curvada para cima e, em caso contrário a superfície do vidro é curvada para baixo.

Pode-se dizer então que no caso do iodeto de metileno num tubo de vidro tem força de adesão maior que a força de coesão, diferente do caso do mercúrio, onde a força de coesão deve ser maior.

Voltando a figura 3.3 e aplicando as condições de equilíbrio, tem-se, para o caso do iodeto de metileno e do mercúrio que:

$$\sum F_x = 0 \quad \therefore \quad \gamma_{LV} \sin \theta - F_A = 0 \quad \therefore \quad F_A = \gamma_{LV} \sin \theta$$

$$\sum F_y = 0 \quad \therefore \quad \gamma_{SV} - \gamma_{SL} - \gamma_{LV} \cos \theta = 0 \quad \therefore \quad \gamma_{SV} - \gamma_{SL} = \gamma_{LV} \cos \theta$$

Mas, o que diz fisicamente estas equações?

$$F_A = \gamma_{LV} \sin \theta \quad \text{Eq. 3.1}$$

A equação 3.1 permite calcular a *força de adesão*, se conhecida a tensão superficial entre o Líquido e o Vapor e o ângulo de contato. Enquanto que:

$$\gamma_{SV} - \gamma_{SL} = \gamma_{LV} \cos \theta \quad \text{Eq. 3.2}$$

Diz que a medida de curvatura (segundo membro da referida equação) da superfície de separação entre o líquido e o vapor que está adjacente à parede, conforme figura 3.3, depende da diferença de tensões superficiais entre interfaces: sólido-vapor e sólido-líquido.

$$\begin{aligned} \text{Se } 0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ \text{ então } \cos \theta \text{ é positivo} &\Rightarrow \gamma_{SV} > \gamma_{SL} \\ \text{Se } 90^\circ < \theta \leq 180^\circ \text{ então } \cos \theta \text{ é negativo} &\Rightarrow \gamma_{SV} < \gamma_{SL} \end{aligned}$$

Assim, no primeiro caso o líquido *molha o vidro*, como no caso do iodeto de metileno; e no segundo caso se diz que o líquido *não molha o vidro*, como no caso do mercúrio.

O fato de molhar ou não o vidro liga-se ao ângulo de contato, que tem dependência com a parede do tubo fino e do líquido, como no caso da água num tubo fino de prata onde, com o uso das equações 3.1 e 3.2 pode-se argumentar o fato físico-matemático.

*Sabe-se da equação 3.2 que, se $\cos 90^\circ = 0$ tem-se, por isso, $\gamma_{SV} = \gamma_{SL}$
Enquanto que, na equação 3.1, $F_A = \gamma_{LV} \sin 90^\circ = \gamma_{LV}$, isso porque $\sin 90^\circ = 1$*

Há agora mais um elemento físico, *ângulo de contato*, para explicar a curva de líquidos num tubo fino; dessa forma, quando este ângulo é menor que um ângulo reto, a curvatura é côncava e o líquido molha as paredes do vidro, caso contrário, quando o ângulo é maior que um ângulo reto, a curvatura é convexa e o líquido não molha as paredes do vidro (figura 3.3).

Esse processo de molhar ou não as paredes são denominadas de umidificação “que surge da interação entre as moléculas do líquido e as moléculas do corpo sólido e tem como resultado a curvatura da superfície do líquido junto à superfície do corpo sólido” (BUKHOVTSEV, *et. al.* 1987, p. 108) e, está ligada a capilaridade.

Por isso, corpos de grandes números de canais (dutos) finos, ou capilares, absorvem

líquidos e, para tal, basta que esses líquidos umedeçam a superfície dos corpos, como, por exemplo, uma toalha que, quando boa, absorve bem a água.

No Recife é comum se ver, em alguns de seus bairros, um problema nas paredes de casas devido à umidificação das mesmas, causando problemas de estética (mancha nas paredes), de saúde (problemas respiratórios devido a frieza com o surgimento de fungos nessas paredes manchadas) e de limpeza (cuidados permanentes serão necessários, como pintura e lavagem do local para evitar surgimento do mofo). Este fato se dá porque o tijolo é um corpo sólido poroso que absorve a umidade do solo. Uma vez que, devido aos capilares no solo a água sobe através de seus caminhos aleatórios e finos.

Os efeitos da capilaridade da água no solo são ditos casos de percolação que ocorrem na natureza, pois percolação é a perda do movimento da água num terreno maciço pelo atrito viscoso da água com as partículas do solo; logo, entre dois pontos distintos de um filete de água há perdas e essas são devidas ao que se conhece fisicamente como forças de percolação, segundo Feitosa (s/d)¹.

Esse é o problema enfrentado pela engenharia na construção de estradas, pois a água sobe por capilaridade e diminui a durabilidade da pavimentação; já nas construções de barragens, tem-se o problema da água que pode ultrapassar barreiras impermeáveis fluindo para reservatórios subterrâneos. Esses processos são devidos ao fenômeno da capilaridade e, daí sua importância física para sistemas porosos com a ocorrência da transferência de umidade na engenharia civil.

O ÂNGULO DE CONTATO

Colocando uma gota de água sobre a superfície de vidro a mesma tende a molhar a superfície, pelo processo de umidificação ou molhabilidade, e apresenta ângulo de contato no contorno da superfície da gota e a interface líquida – sólida.

O ângulo de contato relaciona-se com as tensões entre as interfaces: sólida e vapor; sólida e líquida; líquida e vapor, conforme equação 3.2. Ver figura 3.4

Situação idêntica ocorre se a gota de água está sobre superfície de cera (parafina). Neste caso, o ângulo de contato é maior que 90°, ver figura 3.5 (lado esquerdo); porém, se for adicionada uma impureza (detergente), o ângulo de contato muda de forma considerável (lado direito da mesma figura 3.5).

1. FEITOSA, Laércio. Movimento da água no solo (percolação). Texto disponível em <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAA0GIAB/movimento-das-aguas-no-solo-percolacao>>. Acesso em 16 abr. de 2016.

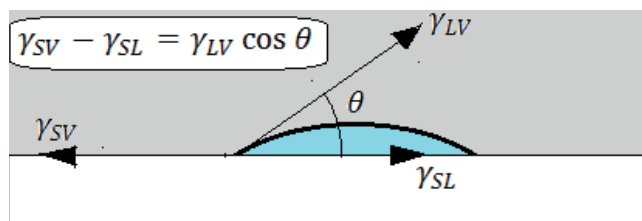


Fig. 3.4 ângulos de contato entre a gota de água numa superfície de vidro

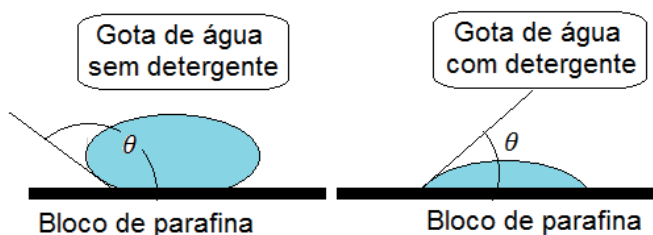


Fig. 3.5 Gota de água sobre parafina (sem e com detergente)

Essas substâncias (como o detergente) são chamadas de surfactantes e têm o papel de diminuir a tensão superficial. O ângulo de contato foi descoberto por Thomas Young (1805), ao estudar a caracterização de propriedades de superfícies sólidas buscando interação entre superfícies de líquidos e sólidos.

A DETERMINAÇÃO DA ALTURA CAPILAR

Observa-se outro elemento físico na compreensão do ângulo de contato que é a força de coesão (entre moléculas), também de curto alcance como a força de adesão.

Assim, quando a força de adesão (F_A) é maior que a força de coesão (F_C) ($F_A > F_C$) o líquido tem $h > 0$ e, em caso contrário ($F_A < F_C$) o líquido tem $h < 0$. Para tal, a análise física será feita com a semelhança da figura 2.10, que fica assim compreendida no contexto dessas forças de adesão e coesão.

Assim têm-se nos dois casos da figura 3.6 ações capilares. Primeiro com $h > 0$ onde há um equilíbrio das forças de tensão superficial sobre a curva de nível e a força peso da coluna de líquido do cilindro de área A e altura h .

A condição de equilíbrio é soma de todas as forças nessa direção (eixo $-y$) seja nula.

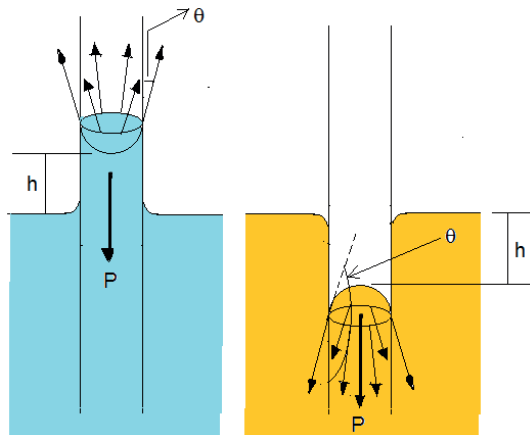


Fig. 3.6 Forças de tensão superficial num líquido num tubo capilar

$$\sum f_s = F \quad \therefore \quad F = \gamma_{LV} L \cos \theta \quad \therefore \quad F \equiv \gamma(2\pi r) \cos \theta$$

$$P = mg \quad \therefore \quad P = \rho V g \quad \therefore \quad P = (\pi r^2 h) \rho g$$

$$\sum F_y = 0 \quad \therefore \quad F - P = 0 \quad \therefore \quad F = P$$

$$\gamma(2\pi r) \cos \theta = (\pi r^2 h) \rho g \quad \therefore \quad 2\gamma \cos \theta = r h \rho g$$

$$h = \frac{2\gamma \cos \theta}{r \rho g} \quad \text{Eq. 3.3}$$

Esta é a chamada *Lei de Jurin* ($h \propto r^{-1}$)

Como

$$F \equiv \gamma(2\pi r) \cos \theta \quad \therefore \quad \gamma = \frac{F}{2\pi r [\cos \theta]} \quad \text{com } F = P$$

$$\text{Como } P = \pi r^2 h \rho g \quad \text{logo } \gamma = \frac{\pi r^2 h \rho g}{2\pi r [\cos \theta]} \quad \text{daí}$$

$$\gamma = \frac{r h \rho g}{2 \cos \theta} \quad \text{Eq. 3.4}$$

Se o líquido molha totalmente a parede capilar (ver figura 3.3 quando $\theta = 0^\circ$ o que ocorre com y_{LV} aqui tratada como idêntica a y), tem-se $\cos \theta = 1$ assim, tem-se:

$$h = \frac{2\gamma}{r\rho g} \quad \text{Eq. 3.5} \quad e \quad \gamma = \frac{r h \rho g}{2} \quad \text{Eq. 3.6}$$

$$\text{De 3.5 tem-se: } \frac{2\gamma}{r} = \rho g h \quad \therefore \Delta p = \frac{2\gamma}{r} \quad \therefore \Delta p = \rho g h$$

Com $h < 0$, o equilíbrio está entre forças de tensão superficial sobre a curva de nível e o empuxo devido ao peso da coluna de líquido do cilindro de área A e altura h , cuja soma de todas essas forças (eixo $-y$) seja nula.

Observe que $h < 0$ logo $\cos\theta < 0$, também, com isso, os dados são idênticos, para as equações 3.3 e 3.4.

TENSOATIVOS OU SURFACTANTES: A FÍSICA NAS INTERAÇÕES MOLECULARES

É de conhecimento popular a existência de produtos de diferentes marcas com o objetivo de tirar manchas e sujeiras de roupas, no processo de lavagem.

Esses produtos são adicionados à água como forma de diminuir sua tensão superficial e, dessa forma, permitir maior espalhamento e profundidade da água no local a ser limpo. Compostos com esta finalidade são chamados de tensoativos ou surfactantes.

Um exemplo de um elemento surfactante é o sabão (ou detergente) que adora substâncias aquosas e gordurosas. Quem lava pratos e roupas sabe muito bem disso. Mas, o que fisicamente conduz a esse fato?

Esse fato se deve a geometria molecular dos tensoativos que tem cabeça polar (de afinidade com a água) e uma cauda apolar (que não tem afinidade com a água).

As cabeças polares são por esse motivo, chamadas de *hidrofílica* e que, fisicamente, estão carregadas eletricamente. Enquanto que as moléculas apolares são chamadas de *hidrofóbica* e que fisicamente não estão carregadas eletricamente, são moléculas neutras.

Assim, numa superfície ensaboada (água e sabão) as moléculas de sabão tendem a orientar-se com suas caudas hidrofóbicas saindo da superfície enquanto que as cabeças hidrofílicas ficam enterradas na água².

Na figura 3.7 tem-se uma camada dupla de moléculas de sabão. Observe o grupo hidrofóbico com caudas para fora nos dois lados da molécula, enquanto que o grupo de cabeças hidrofílicas fica no interior entre as duas camadas.

Os mecanismos físicos de ação dos tensoativos ou surfactantes estão na proposição de mudar a tensão superficial do líquido.

2. Disponível em: <<http://www.cns.gatech.edu/~predrag/courses/PHYS-4421-13/Lautrup/surface.pdf>>. Acesso em 24 mar. de 2016.

Por exemplo, o álcool quando misturados à água aumenta a tensão superficial da mesma. Isto ocorre porque o álcool é uma substância orgânica polar, logo pertence ao grupo hidrofílico.

Desse modo, compreende-se que mecanismos físicos de interação molecular, atração/repulsão eletrostática e capacidade de concentração molecular são próprios dos materiais tensoativos ou surfactantes.

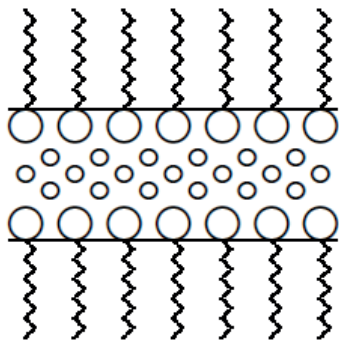


Fig. 3.7 Esquema de camada dupla de moléculas de sabão

<<http://www.cns.gatech.edu/~predrag/courses/PHYS-4421-13/Lautrup/surface.pdf>>.

Assim, álcool e água, por exemplo, criam mecanismos de concentração do soluto com mais intensidade na superfície que no interior das substâncias. Diz-se então que há uma adsorção na superfície. No caso de uma solução diluída, não iônica, tem-se a equação de Gibbs³, dada por (R constante universal dos gases):

$$\Gamma = -\frac{c}{RT} \frac{d\gamma}{dc} \quad \therefore \quad \frac{c}{dc} \equiv \frac{1}{d \ln c} \quad \Rightarrow \quad \Gamma = -\frac{1}{RT} \frac{d\gamma}{d \ln c} \quad \text{Eq. 3.7}$$

E que, Γ é o excesso de concentração do soluto na camada superficial por unidade de área e c é a concentração do mesmo soluto no interior da solução.

A adsorção é a compreensão da concentração de substâncias em superfícies de materiais sólidos, líquidos e/ou bases. Sua natureza é física quando há adsorção física que são forças Interatômicas e as de ligações químicas ou adsorção química. A adsorção física ocorre com interações das forças de Van der Waals⁴ (o que não é de interesse desse nível de ensino, ou Ensino Médio).

3. Texto da UDESC, Centro de Ciências Tecnológicas, DQ sobre Tensão Superficial, disponível em <http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/carlad/materiais/07_08_TensaoSuperficial.pdf>. Acesso em 24 mar. de 2016.

4. Texto do IQ-USP, disponível em: <<http://www2.iq.usp.br/docente/hvlinner/adsorcao.pdf>>. Acesso em 18 abr. de 2016.

A adsorção é um processo que busca o equilíbrio dinâmico entre moléculas interagentes nas substâncias envolvidas que são adsorvidas e dessorvidas num processo com temperatura constante, segundo op. cit.

Quando esta concentração aumenta, ocorre a saturação e, a consequência é à diminuição da tensão superficial, fazendo com que moléculas tenham no interior do líquido as mesmas orientações que na superfície gerando agregados coloidais, as micelas, que devido ao decrescimento da energia livre ocorre o fenômeno da Concentração Crítica Micelar (CCM)⁵. Ver-se que o fenômeno da capilaridade está associado ao fenômeno da tensão superficial, com suas ligações nas forças de curto alcance e tem tentáculos para além da física e da química, pois, abraçam a biologia e a engenharia, sendo então um tema necessário a ser discutido no Ensino Médio.

PARA DESCONTRAIR

Reescreva a equação 3.3 para o caso da água em capilares de vidro, uma vez que, tem-se: $\gamma = 0,073 \text{ N/m}$; $\theta = 0^\circ$; $r = 1000 \text{ kg/m}^3$ e $g = 9,80 \text{ m/s}^2$.

$$h = \frac{2\gamma \cos\theta}{r\rho g} = \frac{2 \times 0,073 \times 1}{1000 \times 9,80} = \frac{0,146}{9800} = \frac{1,5 \times 10^{-5}}{r}$$

E, se o diâmetro do referido tubo tivesse raio de 0.1 mm, qual a altura subirá a água nesse tubo capilar?

$$h = \frac{1,5 \times 10^{-5}}{r} = \frac{1,5 \times 10^{-5}}{1 \times 10^{-4}} = 0,15 \text{ m} = 15 \text{ cm}$$

5. Texto da UFSM do Grupo de Ensino da Física, sobre Tensão Superficial, disponível em <<http://coral.ufsm.br/gef/Fluidos/fluidos20.pdf>>. Acesso em 24 mar. de 2016.

APÊNDICES

APÊNDICE – A

O conhecimento de tensão, tensão superficial e capilaridade, tem tentáculos na física, química, matemática, biologia e engenharia. Desse modo, aqui se apresenta uma rota de exposição, embora não seja um receituário, de caminhos desse tema no contexto da biologia, com o objetivo de se fazer dinamizar o conteúdo tensão, tensão superficial e capilaridade dentro das Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias.

Pontos que podem ser tratados no conteúdo densidade

- ✘ O *sangue* tem densidade normal de 1,06 g/mL, porém com o aumento de concentração de células vermelhas esta densidade aumenta; se uma pessoa tem densidade sanguínea menor que a normal isto mostra que há indícios da patologia clínica de anemia. Daí a importância de fazer-se o exame de sangue periódico.
- ✘ Da mesma forma para a *urina* que tem densidade normal de 1,02 g/mL, mas se há aumento nessa densidade urinária isto indica uma excreção de sais e/ou outros corpos minerais que elevam o valor desta densidade. Esse é outro componente que deve fazer-se exame, junto com o exame de sangue, preferencialmente, mas não necessariamente.

Pontos que podem ser tratados no conteúdo pressão

- ✘ O sistema de circulação do sangue no corpo humano pode ser tratado como um transporte de fluido e dessa forma a pressão sanguínea é outro exemplo clássico de importância vital, que tem relação com o clima e saúde de pessoas. Assim, buscas de controle de doenças cardiovasculares (medicina preventiva), é fator de importância social, onde a frequência cardíaca e a pressão arterial são dois elementos fundamentais, bem como fatores atmosféricos.

Em condições normais o coração bombeia sangue numa faixa de frequência entre 60 a 80 *batimentos por minuto*. Essa funcionalidade tem como princípio levar oxigênio e nutrientes para os organismos em todo o corpo humano, assim, conforme diz Foss; e Keteyian, (apud PINHO JÚNIOR, LIMA & OLIVEIRA, 2007)¹

A frequência cardíaca corresponde à frequência com que as câmaras cardíacas – átrios e ventrículos contraem-se (sístoles) e relaxam-se (diástoles). A frequência cardíaca varia de acordo com o grau de atividade e situação emocional em que o indivíduo se encontra. Os padrões de frequência cardíaca estabelecidos são: Para homens, o padrão de normalidade estabelecido é de

1. Disponível em: <http://www.unama.br/graduacao/fisioterapia/pdf/2007/Estudo_comparativo_da_frequencia_cardiaca_e_da.pdf>. Acesso em 15 mai. de 2014.

70 batimentos por minuto. Já para as mulheres é de 80 batimentos por minuto.

Partindo do conceito de pressão manométrica, compreende-se então que a pressão arterial corresponde à força (tensão superficial) com que o sangue em circulação exerce sobre as paredes das artérias, que são *dutos* de condução do fluido sanguíneo. Fato que é compreendido pelo princípio de Pascal, o qual diz que pressão aplicada num ponto no interior de um fluido é transmitida, sem perdas, a qualquer outro ponto do fluido e as paredes do recipiente no qual este se encontra.

Dessa forma, a *pressão arterial é maior quando o coração bombeia o fluido sanguíneo e é menor quando há um relaxamento do coração entre os batimentos*. Este fato explica ter-se uma pressão de valor máximo e outra de valor mínimo. Por isso, os médicos consideram um limite saudável para o corpo humano a *pressão sistólica* de 120 mmHg (máxima) e a *pressão diastólica* de 80 mmHg (mínima), expressando a fala 12 por 8, que significa 120 mmHg/80 mmHg.

Sua compreensão está no comportamento do músculo cardíaco denominado de sistólico e diastólico. E tem a seguinte caracterização. (DE PAULA, *et. al.* 2005).

Na sístole ocorre uma contração do músculo cardíaco, causando assim um aumento do volume sanguíneo na aorta, o que provoca um aumento da pressão, que chega a atingir, em níveis normais, 140 mm Hg. O contrário ocorre na diástole, onde há uma distensão do músculo cardíaco, diminuindo o volume sanguíneo na aorta, que provoca uma diminuição da pressão, a qual, em níveis normais, atinge 90 mmHg

Onde o fator principal dessa bomba cardíaca é manter o fluxo sanguíneo em todo corpo com finalidade de nutrir diferentes tecidos que compõe a malha corpórea.

✖ Com igual importância está o fato da administração de *terapia* intravenosa, onde o profissional que vai executar tal procedimento, ao encontrar a veia, deita o embolo junto com a agulha, próximo do braço do paciente e faz a agulha penetrar na veia de forma vagarosa, deixando o sangue se misturar com a solução química dentro do embolo, por um pequeno intervalo de tempo, esperando a igualdade da pressão sanguínea com o produto a ser injetado, para que depois, de forma lenta, faça entrar o produto na corrente sanguínea do paciente, vagarosamente, ou seja, sem modificar de forma drástica a pressão arterial do paciente, evitando a *embolia aérea* que é à entrada de ar de forma acidental no sistema venoso no momento de injeção endovenosa, fato que expressa à possibilidade de levar a óbito o paciente.

✖ Ainda sobre esse tema tem-se o caso de pessoas quando são medicadas e levadas a tomar soro (solução salina) que é um processo de terapia intravenosa. Observa-se sempre que o bulbo com o soro (solução salina) fica pendurado num suporte para soro, numa altura h entre o braço, onde está sendo aplicado o soro e o bulbo, com $p = pgh$, uma vez que o

no bulbo fechado $p_o = 0$ logo $\Delta p = p$. Esta é a medida da pressão hidrostática, ou pressão efetiva, que é a pressão exercida pelo peso da coluna fluidica em equilíbrio, como o bulbo que contém a solução salina com coluna fluidica até o braço do paciente.

✘ Outra doença que se origina dos mecanismos de pressão é o *glaucoma*, que pode ser chamado de doença silenciosa²; sua ação não é sentida, no início, e sem dor física, não apresenta sintomas “palpáveis” pelo paciente com problema na visão, havendo na maioria dos casos um desconforto visual e ligeira sensação de dores leves no olho com esse sintoma. Daí o cuidado de sempre fazer exame de vista periodicamente.

O glaucoma é uma neuropatia óptica de característica visual, cujo principal fator de risco é o aumento da pressão intraocular (PIO). Conforme Agência Nacional de Vigilância Sanitária³ (ANVISA) é a segunda maior causa de cegueira no mundo.

Segundo a ANVISA, a doença tem como princípio o distúrbio no qual a pressão do globo ocular aumenta, devido ao acúmulo de humor aquoso (líquido fino que preenche as câmaras do olho) lesando o nervo ótico e causando a perda da visão.

Porém a *pressão intraocular* (PIO) não é sempre uma patologia, se ela tem níveis aceitáveis (valores menores que 21 mmHg). Na realidade os movimentos dos olhos promovidos pelo piscar, mudança de direção do olhar e o movimento de pálpebras, promovem pressão sobre o globo ocular e a diferença da pressão intraocular e a pressão atmosférica, produz uma pressão relativa, fator de equilíbrio para evitar a deformação do globo ocular como também é o modo de prevenir o inchaço de alguns tecidos dos olhos, segundo Dantas, 2009. Este fato é importante trabalhar na sala de aula, pois o glaucoma é uma doença que pode atacar crianças, jovens e adultos, tendo tendência de estarem presentes em pessoas maiores de 40 anos. Deve-se ressaltar, no entanto que a pressão intraocular (PIO) não é a causalidade do glaucoma, que tem aparecimento devido às lesões no nervo óptico.

No processo de descrição do glaucoma pode-se descrever em linhas gerais o funcionamento do globo ocular relativo aos fluidos nele existentes e denominados de humor aquoso e vítreo. Estes fluidos têm a finalidade de transmitir a luz incidente no olho até a retina, onde essa membrana converte estímulos nervosos em imagens.

Os humores aquoso e vítreo (fluidos do globo ocular) têm na normalidade, valores médios de 15 mmHg. O humor aquoso está entre a córnea e a íris, numa região denominada de *câmara anterior do olho* formada por uma solução de baixa concentração. Enquanto que o humor vítreo está na *câmara posterior*, que fica entre o cristalino e a retina e tem

2. GLAUCOMA A DOENÇA SILENCIOSA, apostila da Editora INESP, produzida pela Assembleia Legislativa do Ceará, disponível em <file:///C:/Users/Mario/Downloads/glaucoma.pdf>. Acesso em 20 mai. de 2014. Este é um artigo de Luiz Bezerra DANTAS.

3. ANVISA, Revista; Saúde e Economia: Glaucoma. Ano I, Edição Nº 2, Novembro de 2009. Disponível em <http://200.214.130.94/rebrats/publicacoes/Saude%20e%20Economia.pdf>. Acesso em 05 mai. de 2014.

aparência gelatinosa e maior quantidade de concentração que o humor aquoso.

Outro fato importante na constituição ocular é a íris, que funciona como um diafragma que controla a luminosidade através do cristalino fazendo aumentar ou diminuir a pupila. Enquanto que o cristalino forma uma lente variável que refrata a luz incidente no olho, ou seja, raios que penetram no globo ocular; e tem camadas concêntricas de células fibrosas, contendo cerca de 60 a 70 % de água (fluido), e são capazes de concentrar raios luminosos para formação de imagens na retina.

✂ A pressão osmótica é outro aspecto que deve ser explorado dentro dum projeto multidisciplinar quando o tema físico for pressão.

A pressão osmótica ocorre quando há diferença de concentração de água: por exemplo, água pura (solvente) e água numa solução (soluto).

Compreende-se a **osmose** como um processo onde a água se movimenta de forma autônoma e livre, atravessando uma membrana semipermeável das regiões de maior concentração de água (solução diluída ou solvente) para regiões de menor concentração da água (solução concentrada ou soluto), onde maior concentração de soluto implica numa menor concentração de água.

A idealização da membrana semipermeável significa que a mesma permite a passagem da água e *não* de solutos, na natureza ela é constituída de materiais que permite a passagem do solvente, mas não a passagem do soluto nessa solução.

Como todas as células vivas são revestidas por membranas semipermeáveis, então a osmose tem importância ímpar em processos biológicos e, desse modo a passagem de fluidos (solutos) através das membranas celulares pode ser efetuada pela ação osmótica, pela difusão ou por qualquer outra atividade ativa de transporte. E dentro desse espectro de compreensão, a *diálise*, “processo pelo qual produtos metabólicos inúteis e/ou tóxicos são removidos do sangue pelos rins” (OKUNO, 1982, p. 339). Nos rins, as membranas semipermeáveis, que também têm a função de filtração, são os chamados glomérulos contidos nos néfrons, ver figura A.1. A mecânica processual é a de que. (*Idem*. p. 339).

A separação de solutos do solvente (sangue) ocorre devido a pressão osmótica (da ordem de 30 mmHg)⁴ existente face a variação de concentração dos solutos; enquanto que a filtração só se processa quando há uma diferença de pressão hidrostática (da ordem de 40 mmHg) através da membrana. Assim, para que os rins, com cerca de 1.000.000 de néfrons, em cada um, possam funcionar, a pressão sanguínea deve ser no mínimo, da ordem de 70 mmHg. Portanto, uma queda de pressão prolongada, pode provocar graves problemas.

Embora saibamos que, se apenas um dos rins estiver funcionando bem, a função de depurar o sangue pode ser resolvida sem problema. Este é o caso de algumas pessoas

4. 30 mmHg = 0,04 atm; 40 mmHg = 0,05 atm; 70 mmHg = 0,09 atm.

fazerem *doação* de um desse órgão para familiares ou parentes. Mas, se os dois rins falharem ocorrem à *uremia* (intoxicação do sangue por retenção de toxinas nocivas ao mesmo e, se não for feito o procedimento da *hemodiálise*, a pessoa poderá vir a óbito).

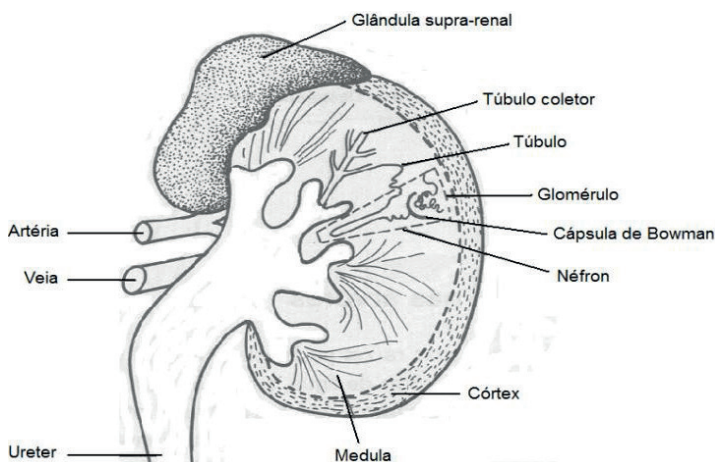


Fig. A.1. Configuração de um Rim para compreensão do processo de diálise.

Okuno, (1982, p. 339)

✂ Da Biologia sabe-se que alguns animais fazem uso do Princípio de Pascal para seu movimento como o caso de minhoca da terra, chamados gogos ou cobra de duas cabeças. O seu movimento é conhecido como “esqueleto hidrostático”, uma vez que seus músculos produzem movimento nos ossos do esqueleto de modo a permitir o deslocamento rastejante. Vamos entender este processo modelando um animal de forma cilíndrica fechada e elástica com líquido em seu interior, ou seja, cria-se um modelo físico e mecânico do movimento.

Sabe-se que o verme produz um movimento ao longo do caminho tomado na direção do movimento, ou seja, movimento longitudinal promovido pela contração de seus músculos e, um movimento circular promovido pelos músculos ao redor das paredes do cilindro hipotético, conforme Davidovits (2008).

Por ser o volume constante de líquido no cilindro (verme) isto sugere que as contrações provoquem o fato de vermes mais finos. E as contrações longitudinais vão definir se os vermes são cumpridos ou curtos, segundo op. cit.

Assim o caminhar de um verme pode ser compreendido como a superposição de dois movimentos (longitudinal e circular) de forma sequencial fazendo com que o verme se mova para frente ou para trás. Assim, o verme ou “minhoca modelo” tem aparência cilíndrica de raio r , com músculos circulares distribuídos uniformemente ao longo do corpo (cilindro)

do animal. Este animal se movimenta produzindo uma força por unidade de comprimento, ou força efetiva.

✂ Outra questão interessante sobre a física dos fluidos se refere a responder: *porque os peixes ficam parados dentro da água (aquários) se sua densidade é maior que da água?* Para peixes permaneçam parados na água sua densidade tem que ser igual à densidade da água. Mas, se densidades de tecidos do peixe e de seus ossos são maiores que a densidade da água; então esses peixes possuem um mecanismo biológico capaz de igualar sua densidade com a da água.

Esses mecanismos são os ossos porosos e a bexiga natatória localizada na cavidade abdominal do peixe que contém um gás cuja variação permite alterar o volume e manter a densidade do animal igual à densidade da água (OKUNO, 1982; DAVIDOVITS, 2008). Como o gás na bexiga natatória tem densidade desprezível com relação à densidade dos tecidos do peixe, então o volume da bexiga natatória é pequeno comparado com dos ossos porosos, de modo a reduzir a densidade do corpo para igualar a densidade da água, segundo Davidovits (2008).

Ainda segundo op. cit. a lula tem um mecanismo de retirar ou injetar fluido de seus ossos porosos para alterar sua densidade alterando a quantidade de gás na bexiga natatória.

Exemplo, a lula é um peixe que tem ossos porosos com densidade igual 0,62 g/cm³ e todo o seu resto com densidade 1,067 g/cm³. Que percentual de densidade do corpo desse peixe faz com que a densidade média do mesmo seja igual a da densidade da água do mar (1,026 g/cm³)? Este é um tipo de peixe que vive no mar a profundidade de 150 m.

Seja x o percentual de densidade do corpo do peixe

Então há 0,62x + (restante)1,067

$$1,026 = 0,62x + (1 - x)1,067$$

$$1,026 = 0,62x - 1,067x + 1,067$$

$$1,026 - 1,067 = (0,62 - 1,067)x \therefore x = 0,092 \text{ ou } x = 9,2\%$$

Como estes peixes vivem a profundidade de 150 m, então os mesmos estão submetidos a uma pressão de $\Delta p = 1,026 \times 10^3 \times 9,80 \times 150 = 15,39 \times 10^5$ Pa. Como 1,0 atm = $1,013 \times 10^5$ Pa, então $\Delta p = 15,39 \times 10^5$ Pa ou $\Delta p = 15$ atm.

Sendo a pressão entre os espaços porosos de 1 atm, pode-se compreender que ossos porosos podem suportar pressão de $p = 15 \text{ atm} - 1,0 \text{ atm}$, ou $p = 14 \text{ atm}$. Embora este resultado seja de uma pressão alta, experimentos têm mostrados que ossos podem suportar pressão de até 24 atm, segundo Davidovits (2008).

✂ Outra questão interessante sobre a física dos fluidos se refere à questão da natação.

Pois, pelo que se conheceu anteriormente, isto mostra que um corpo, à medida que vai se aprofundando no mar, sobre esse corpo vai aumentando a pressão sobre todos seus lados. Então, em mergulhos subaquáticos se a pressão nos dois lados do ouvido não se igualarem, pode ocorrer uma diferença de pressão de 120 mmHg, que segundo Okuno (1982), pode causar a ruptura do tímpano.

Daí ser importante, no mergulho, manter a boca e o nariz fechados, forçando um pouco do ar dos pulmões irem para as trompas de Eustáquio (op. cit. p. 310). Assim, para evitar mal-estar nos tímpanos, num mergulho, é aconselhável fazer bocejo ou mastigação de modo a manter a pressão externa e a pressão interna do ouvido equalizada, segundo Okuno.

Outro fato é que a pressão dos pulmões, em qualquer profundidade num mergulho é maior que a pressão ao nível do mar e, isto provoca um aumento parcial da pressão dos componentes do ar (oxigênio) e, dependendo desse aumento, diz Okuno (1982, p. 310), pode ocorrer um envenenamento por oxigênio, ou seja, pode ocorrer a oxidação de enzimas dos pulmões, vindo a ocorrer convulsões.

Ainda dentro desse contexto de mergulho, quando um bebê prematuro é indicado a tomar (um banho) oxigênio puro, há, segundo Okuno (1982, p. 310) a ocorrência de grandes riscos de desenvolver a cegueira devido ao bloqueio do desenvolvimento de vasos sanguíneos.

PONTOS QUE PODEM SER TRATADOS NO CONTEÚDO TENSÃO

✂ Na estrutura do corpo humano os ossos tem papel importante nesse contexto. E um de seus comportamentos e de características físicas é dar respostas imediatas quando está sobre tensão, na forma⁵:

Características Anisotrópicas: comportamento varia de acordo com a direção da aplicação da carga. Suporta maiores cargas no sentido longitudinal.

Características Viscoelásticas: comportamento varia de acordo com a velocidade com que a carga é aplicada e com a duração da mesma.

Resposta Elástica: quando a carga é aplicada, o osso deforma-se por uma mudança de comprimento ou formato ($\epsilon = 3\%$). Retirada a carga o osso volta ao comprimento normal.

Resposta Plástica: após atingir o ponto de deformação, começa aparecer microrrupturas, o osso deforma-se permanentemente, podendo chegar a faturar-se.

Os ossos têm estrutura irregular e podem sofrer diferentes cargas sobre sua

5. Texto de resumo de aula da Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, disponível em <http://webensino.unicamp.br/disciplinas/EF920-289819/apoio/1/aulas12e19_03_07.pdf>. Acesso em 16 abr. de 2016.

estrutura, que são chamadas cargas combinadas, pois os ossos do corpo humano estão submetidos a diferentes tipos de forças concomitantemente. Segundo Mota, Carlos Bolli (s/d), biomecânica: *ossos*. Texto da Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, Laboratório de Biomecânica⁶, essas forças são:

Força gravitacional, forças musculares e outros tipos de forças, eles geralmente estão submetidos a mais de um tipo de carga. A combinação de duas ou mais formas puras de carga é chamada carga combinada. A forma irregular e a estrutura assimétrica dos ossos também contribuem para o surgimento de cargas combinadas.

PONTOS QUE PODEM SER TRATADOS NO CONTEÚDO TENSÃO SUPERFICIAL

✂ Uma referência para tensão superficial é os pulmões. Os pulmões são constituídos de alvéolos pulmonares. Para Okuno (1982, p. 343)

Os alvéolos pulmonares são fisicamente semelhantes a milhões de pequenas bolhas de 100 a 300 μm de diâmetro, interligados, formando sacos alveolares e, num adulto existe cerca de 250 a 350 milhões alvéolos, cobrindo uma superfície de 75 m^2 , que aumenta quando ocorre a respiração. Uma rede interna de capilares⁷ cobre quase a totalidade dessa área. Os sacos alveolares possuem dimensões variadas, e suas paredes são compostas por uma membrana fina, que é banhada por uma camada de fluido. As propriedades elásticas dos alvéolos dependem principalmente das propriedades mecânicas da membrana e da tensão superficial do fluido.

Além disso, nos pulmões existe uma secreção de uma mistura lipoproteínas, segundo Okuno, por células secretoras especiais, que tem como efeito o de diminuir a tensão superficial, do mesmo modo como faz o detergente na água. Essas lipoproteínas seriam as substâncias surfactantes, como é o detergente para água.

✂ O tratamento de canal ou tratamento endodôntico, na odontologia, tem em seus estudos físico-químicos a necessidade do conhecimento da tensão superficial. Isto se dá devido à “necessidade que o líquido irrigante dos canais radiculares ou medicação intracanal tenha o maior contato possível com as paredes dentinárias e sistema de canais”, segundo Ottoni, *et. al.* (2007, p. 16). A necessidade física está atrelada a “capacidade de molhamento da substância irrigante ou medicamento para que o efeito químico seja o esperado” (op. cit).

Nos estudos sobre tensão superficial foi caracterizado que ele depende do material

6. Disponível em <<http://www.ufsm.br/labiomec/biomecanica/ossos>>. Acesso em 16 abr. de 2014.

7. Capilares, são túbulos delgados em cujas paredes ocorre o intercâmbio metabólico entre o sangue e os tecidos, têm estrutura física da ordem alguns micrômetros, e “são permeáveis, e estão presentes nos tecidos do corpo humano, cedendo nutrientes, oxigênio e hormônios às células”, como uma teia. Disponível em: <<http://www.sobiologia.com.br/conteudos/Corpo/Circulacao3.php>>. Acesso em 01 de fev. de 2016.

ou composto químico e da temperatura e, nesse contexto o hipoclorito de sódio, com concentração de 1% é usado em consultório odontológico e tem tensão superficial de 60,75 dina/cm, medido por Ottoni, *et. al.*

Mas, estudos em “mensuração da tensão superficial de diferentes substâncias utilizadas na terapia endodôntica⁸” aponta parecer (op. cit. p 17):

uma contradição o hipoclorito de sódio ser um fármaco tão difundido se este tem pouca capacidade de contato com as superfícies, em razão de sua tensão superficial ser de 60,75 dinas/cm. Porém, é plausível mencionar que o hipoclorito de sódio ao reagir com as gorduras forma sabões que agem de forma a melhorar as forças adesivas do fármaco com o meio.

Essas informações da medicina odontológica justifica a necessidade desse conhecimento no contexto da Física e da Química. Neste contexto há exigência dos conhecimentos de tensão superficial e capilaridade, como se pode ver na citação de Lopes *et. al.*, 2014 (Op. cit. p. 12-13).

Como os sólidos, no caso as paredes do canal radicular, exercem força de atração sobre as moléculas dos líquidos, quando essa força é maior do que a tensão superficial dos líquidos, ocorre o molhamento ou umectação das paredes do canal. Esta interação também explica a capilaridade, que é o poder de o líquido se elevar em tubos capilares ou entre duas superfícies próximas entre si. A capilaridade, que é inversamente proporcional à tensão superficial, traduz o comportamento do líquido em anfractuosidades, reentrâncias ou ramificações na cavidade pulpar. Estudos in vivo e in vitro mostram que a tensão superficial das soluções químicas auxiliares determina a profundidade de penetração do líquido no canal. Portanto, quanto menor a tensão superficial de uma substância, maior será a sua capacidade de umectação e penetração, aumentando a efetividade de limpeza das paredes do canal radicular.

Este caso particular da odontologia mostra o quanto é importante esse estudo da capilaridade e tensão superficial dentro da concepção Física, mas também dentro do contexto da Medicina, que não deixa de ser uma ponte com a Biologia.

PONTOS QUE PODEM SER TRATADOS NO CONTEÚDO CAPILARIDADE

O ponto interesse para explicar a elevação da seiva é o fenômeno de capilaridade. E, segundo Okuno (1982, p. 340), no sentido ascendente, das raízes às folhas, o líquido flui transportando os nutrientes minerais retirados do solo, que mantém viva as células da árvore. E no sentido descendente, flui um líquido, fixado pelo processo da fotossíntese, que serve de alimento para crescimento de árvores.

Mas, a pressão atmosférica de 1 atm significa corresponder a uma coluna de altura

8. Stomatos, vol. 13, núm. 24, janeiro-junho, 2007, pp. 11-20, Universidade Luterana do Brasil. Disponível em: <<http://www.redalyc.org/pdf/850/85002403.pdf>>. Acesso em 27 de out. de 2014.

de 10,3 m, pois:

$$h = \frac{P}{\rho g} \quad \text{daí} \quad h = \frac{1,013 \times 10^5}{10^3 \times 9,80} = 10,3 \text{ m}$$

Com este resultado pode-se questionar: como pode haver vida em árvores maiores que 10,3 m de altura? Como é o caso do eucalipto. Neste contexto se pode perceber que a ação única da pressão não justifica por se só a elevação da água do solo até a ponta de árvores.

Ou seja, o líquido que sobe e desce, constitui a seiva, cujo transporte se dá através do xilema. Que se situa na parte interna das árvores, em diferentes secções, segundo Okuno (1982).

Exemplo:

O condutor de xilema de uma árvore com 50 m de altura possui um raio médio $r = 0,050$ mm. Sendo a tensão superficial média da seiva bruta $\gamma = 0,55$ N/m; a densidade $\rho = 1,0$ g/cm³ e o ângulo de contato de 45°, qual a altura alcançada pela seiva bruta? Que análise você faz desse resultado?

Solução:

$$h = \frac{2\gamma}{\rho g r} \cos\theta = \frac{2 \times 0,55 \times 0,707}{1,0 \times 10^3 \times 10 \times 0,05 \times 10^{-3}} = 15,554 \quad \text{ou} \quad h = 15,6 \text{ m}$$

Observe que a altura encontrada está longe de 50 m, porém a seiva bruta deve alcançar o pico da árvore. Isto significa que não é somente a compreensão da capilaridade que faz o xilema conduza seiva bruta da raiz ao topo da árvore, há outras forças envolvidas além dos mecanismos próprios da ação biológica.

Assim, um mecanismo a mais para explicar a subida da seiva é a osmose. Por exemplo, qual a pressão osmótica necessária para conduzir seiva ao topo de uma árvore de 30 m de altura, num ambiente com temperatura de 20 °C?

$$\pi = \Delta P \quad \text{Eq. A. 1}$$

Esta equação diz que a osmose cessa quando a pressão osmótica é compensada pelo aumento da pressão hidrostática, segundo Okuno (1982). E, sendo assim:

$$\pi = \rho g h = 10^3 \times 9,80 \times 50 \cong 5,0 \times 10^5 \text{ N/m}^2 = 5,0 \text{ atm}$$

Para baixas concentrações:

$$\pi = C \cdot R \cdot T \Rightarrow \pi = C_M R T \quad \text{ou} \quad C_M = \frac{\pi}{RT} \quad \text{Eq. A. 2}$$

Dai

$$C_M = \frac{\pi}{RT} = \frac{\Delta P}{RT} = \frac{5 \text{ atm}}{(0,082 \frac{\text{atm} \cdot \text{L}}{\text{osmol} \cdot \text{K}})(293\text{K})} = 0,21 \text{ osmol/L}$$

Logo, a concentração mínima para pressão osmótica de 5,0 atm é de 0,21 osmol/L. Para uma altura média de árvores, se toma $h = 30 \text{ m}$ e, fazendo os cálculos acima se tem a pressão osmótica de 3,0 atm, levando a constituir uma concentração de 0,12 osmol/L, onde, este é um valor, segundo op. cit. que é encontrado nas árvores na primavera, mas em outras estações esse valor de concentração não é encontrado o que dificulta a elevação da seiva.

✂ No contexto da capilaridade pode-se ver uma composição Química que resulta da formação das moléculas mais abundante nas membranas celulares: os fosfolípidios que têm uma parte hidrofílica e outra hidrofóbica. Segundo Rocha (s//d) sua estrutura resulta da ligação de uma molécula de glicerol com dois ácidos gordos e com uma molécula de ácido fosfórico. Esta molécula está presente nos pulmões, ver figura A.2

✂ Na capilaridade o fenômeno dos tensoativos ou surfactantes tem papel importante na biologia. Sabe-se da Lei de Laplace que se duas esferas de raios diferentes estão conectadas e cheias de ar, a esfera de menor raio exerce uma pressão maior que a esfera de raio maior.

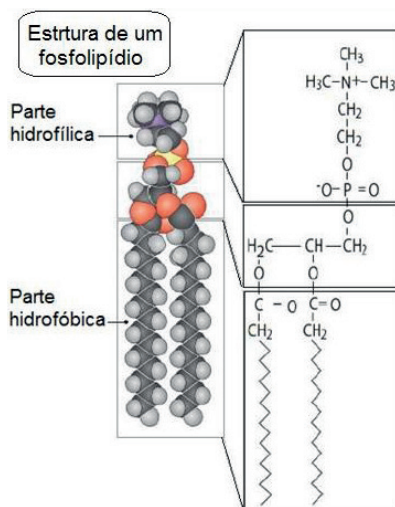


Fig. A.2 Figura da estrutura química de um fosfolípido

<file:///C:/Users/Mario/Downloads/organizaobiologica.pdf>.

Esse conhecimento da física é observado nos pulmões, cujo princípio está na retirada de oxigênio do ar para que possamos manter a vida. A constituição física e biológica desse órgão é feita de um tecido esponjoso possuindo em seu interior os alvéolos pulmonares, que tem formato geométrico quase esférico.

O mecanismo físico de retirada do oxigênio do ar inspiração está associado ao mecanismo de expiração para jogar fora dos pulmões o gás carbônico. Tudo isto é feito pelos alvéolos e pelos capilares que se situam ao redor dos alvéolos.

Assim, durante expiração a pressão dentro dos alvéolos menores é maior que a dos grandes, desse modo, estes pequenos alvéolos deveriam esvaziar para dentro dos grandes; porém, isto não acontece porque o surfactante modifica seletivamente o valor da tensão superficial mantendo a estabilidade entre os alvéolos.

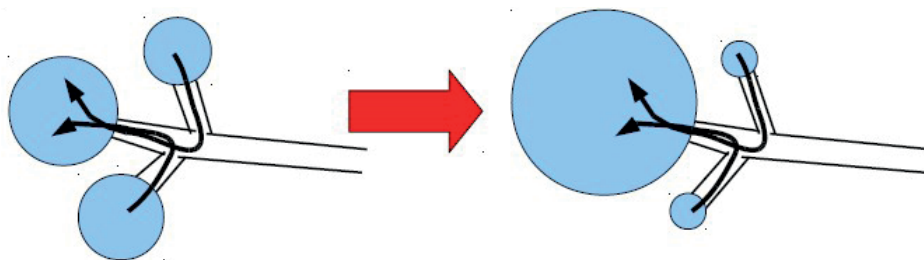


Fig. A.3 Figura da mecânica da Lei de Laplace de como agiriam nos alvéolos pulmonares

<<http://w3.ualg.pt/~rguerra/CBM/aula3.pdf>>.

Esse surfactante é constituído das moléculas de fosfolipídios que reduzem a tensão superficial nas superfícies dos alvéolos para facilitar a difusão do oxigênio.

Entende-se então que há um ciclo respiratório (inspirar e respirar), ou colocar oxigênio para dentro dos pulmões e jogar para fora dos mesmos a gás carbônico. E durante esse ciclo o volume de ar dos alvéolos varia e, quando aumentam seu volume que leva consequentemente ao aumento da superfície entram em ação as moléculas de fosfolipídios adsorvendo as paredes internas dos alvéolos. Ao mesmo tempo, quando diminuem o volume e consequentemente sua superfície comprimem as moléculas adsorvidas. Onde se compreende a físico-química do fenômeno da adsorção como sendo a capacidade de retenção de partículas por interações moleculares na superfície de um líquido.

✧ Os mecanismos de fluxos sanguíneos é outro ponto de interesse na física da capilaridade, pois este é o caminho da circulação do sangue nos seres vivos. E para tal, existem os dutos por onde o sangue circula.

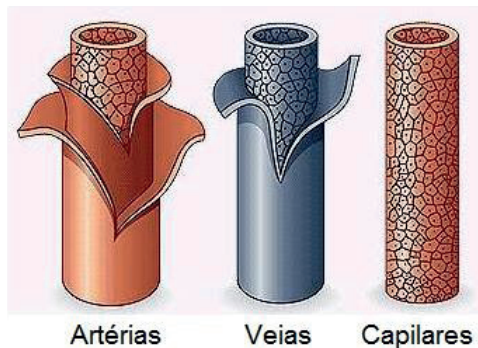


Fig. A.4 Figura de dutos por onde ocorre o fluxo sanguíneo

<http://www.icarito.cl/2010/05/estructura-de-los-vasos-sanguineos-2.shtml/>.

Onde nas artérias se tem três capas: a interna chamada de endotelial; a central formada por fibras musculares e elásticas e, a externa formada por tecidos conjuntivos. As veias são formadas por duas capas: a interna chamada endotelial e a externa formada por fibras musculares, elásticas e conjuntivas. Os capilares só possuem uma camada formada por tecidos endotelial.

É bom deixar claro que outras nomenclaturas para vasos sanguíneos, com mais especificidade na Biologia. Aqui existe só que o interesse em mostrar a função física da capilaridade no contexto da Biologia.

Elementos midiáticos para metodologia multidisciplinar sistêmica

Apresenta-se agora, elementos midiáticos para o professor e o estudante usar, se assim desejarem, como colaboração a mais para vivenciar a física no contexto da biologia, buscando compreender essa linha de pensamento como condição de necessidade da aprendizagem de física de fluido, de modo a ampliar, possivelmente, interesses dos temas, tensão, tensão superficial e capilaridade, como possibilidade de ensino e aprendizagem.

1. 1. O livro *As Conexões Ocultas: ciência para uma vida sustentável*, de Fritjof Capra é uma leitura recomendada e indispensável ao professor de Física. A abordagem da primeira parte desse livro trata da vida, mente e sociedade. É um tripé uno. E a compreensão de sociedade com a comparação de um organismo vivo é muito boa. A segunda parte trata dos desafios do século XXI e, este é o ponto crucial de que professores devem compreender. Por isso, compreende-se ser leitura essencial, na formação do professor de Física. Claro que, os estudantes devem fazer essa leitura para maturar uma discussão em sala de aula.
2. 2. O livro *A Teia da Vida*, de Fritjof Capra também se apresenta como leitura que não deve faltar ao professor de Física, pois em sua construção está a estrutura do *pensamento complexo* (que é o pensamento e visão de mundo do século

XXI) e da *natureza do pensamento sistêmico*. E neste espectro a compreensão de vida e de natureza fundamenta-se no pensamento complexo, essencial também para formação de estudantes.

3. Um texto para o professor trabalhar a compreensão de tensão superficial e dos surfactantes é apresentado pela *Washington University Medical School* (é um texto em inglês) num programa Jovem Cientista, incluso um kit (DVD e materiais) que não temos no Brasil. O programa em inglês é The Young Scientist Program Surface Tension Teaching Kit; de Handout. Está disponível em: <http://ysp.wustl.edu/KitCurriculum/SurfaceTension/Surface%20Tension-Teacher.pdf>. Esta é uma recomendação para trabalhar o conhecimento físico de forma prática.
4. Um livro para o professor compreender a Física atrelada a Biologia e a Medicina é o livro de Paul Davidovits, *Physicis in Biology and Medicine*. É um excelente texto. Escrito com muita propriedade e deve ser um título útil para professores e estudantes. http://server2.phys.uniroma1.it/doc/giansanti/FISICA_TO_2010/Davidovits%20P.%20Physi%20c%23553671.pdf. Esta é uma recomendação ímpar.
5. Um livro que o professor deve fazer uso, embora essa referência não seja para o Ensino Médio, mas é um livro ímpar para o tema tensão superficial e capilaridade no contexto da biologia, que tem título *Física para Ciências Biológicas e Biomédicas* de Emico Okuno, Iberê Caldas e Cecil Chow, e é uma literatura brasileira e, dois capítulos são destaques. O capítulo 19: *Fluidos num Sistema Biológico* e o capítulo 20 que trata de *Movimento e Propriedades de Fluidos*. Este livro tem papel importante para o professor, no sentido da compor mais conhecimento acerca da Física no contexto da Biologia.
6. Para trabalhar a concepção da atmosfera e, conseqüentemente, da vida na terra, a recomendação são dois vídeos sobre *Física e Meio Ambiente*, produzido pela Universidade Estadual da Bahia. No primeiro vídeo o trabalho é feito sobre o uso do Sol, disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=82BD4G0aXiQ>. E explica a fotossíntese de forma excelente. Além disso, o segundo vídeo aborda também a questão ambiental, e a problemática da produção de energia, formação da luz; está disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=syw7IZ1mm58>. São vídeos curtos que devem ser apresentados na turma e depois abrir discussão sobre o tema. Buscando compreender como estudantes representam suas percepções acerca de um objeto da Física junto a Biologia.
7. Quando abordar o tema densidade sabe-se que a densidade urinária faz parte de recurso da biomedicina não invasiva e, desta forma o vídeo *Física na Urina* é muito bom. Disponível em https://www.youtube.com/watch?v=gOkXD_XlaQM. Este vídeo também ressalta a importância da segurança biológica.
8. A compreensão da pressão arterial traz consigo a necessidade de entender como se processa os batimentos cardíacos. E este vídeo mostra como medir a frequência cardíaca. Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=GOIYaE3-7yY>. Isto é bom que jovens e adultos conheçam. Principalmente quando realizar exercícios.
9. Este vídeo mostra como acontece um ataque cardíaco. É muito importante para entender como é ruim a falta do fluxo sanguíneo por acúmulo de gorduras.

Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=INag1QZJ-Pk>; Este vídeo tem função social excelente e faz parte do conhecimento sistêmico da Física e Biologia.

10. Estes dois vídeos são importantes porque mostra como funcionam os fluidos no corpo humano, principalmente no que diz respeito ao infarto, a importância desse vídeo não é somente Física e Biológica, mas também social. É aconselhável exibi-lo numa aula sobre fluido e pressão. É bom exibir na ordem, pois eles contam uma história em 30 minutos (15 minutos para cada vídeo) que envolve esforço físico e má alimentação como causas possíveis de um infarto, além de mostrar a importância do socorro imediato de uma pessoa que inicia o infarto. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=2NEv74sZEEc>. A parte 1; a parte 2 está disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=sCluygXhqpQ>.
11. Vídeo sobre tensão superficial e o uso de surfactantes. Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=fjxEBiH7YHw> Que deve ser explorado na sala de aula, no contexto dos processos investigativos, para buscar argumentações de estudantes.
12. Para falar de força de coesão e tensão superficial, o vídeo tensão superficial e adesão faz isto. Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=nQwjsFvBMqY>. No vídeo há outros exemplos na vida prática sobre surfactantes. Muito bom para exibir numa aula de física e depois abrir uma discussão sobre o tema. Também fala um pouco sobre a formação de meniscos e da capilaridade.
13. A capilaridade é um fenômeno que também atinge o solo. No caso o vídeo Água no solo – Capilaridade é desenvolvido a compreensão química de formação da água, apresentando características de água, trabalhando forças de coesão, tensão superficial, capilaridade (forças de coesão e adesão). Está disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=QP9hIDHkbDs>. Um vídeo de quase 25 minutos e, numa aula deve ser trabalhado conforme desejo do professor. O importante é mostrar o fenômeno físico da capilaridade para o solo.
14. Este vídeo mostra um dos efeitos da capilaridade. Como é um experimento que envolve um tempo enorme para uma aula, ele pode ser executado numa escola durante um período (manhã). Serve também de um complementar da aula sobre o tema. Disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=fphGwNF8NRk>.
15. Aqui é indicação própria para o **professor** que é o livro. *Fundamentos de Mecânica dos Fluidos* de Rogério M. Saldanha Gama. Este livro tem estrutura de mecânica dos fluidos com *formulação matemática de bom nível*, mas esta formulação não está ao alcance do Ensino Médio. Livro publicado pela UERJ / 2012.

Indicação de Literatura no Ensino Médio que formaram a motivação desse livro (Possivelmente, esses livros não mais existam em livrarias do Recife⁹).

- *Imagens da Física* (volume único), de Ugo Amaldi (1992) retrata num capítulo

9. Talvez seja possível nalgumas livrarias do sul do país, ou no sebo se há interesse em adquiri-los. Caso contrário verificar em qual biblioteca (física) possa existir ou procurar em endereços eletrônicos, se assim desejar.

de mecânica o texto “*as propriedades da matéria*”, lugar onde está às forças intermoleculares que é um texto simples no qual aborda a tensão superficial com o exemplo clássico de insetos pousados na superfície da água e sobre força elástica ou Lei de Hooke, apresenta a expressão vetorial correta dessa lei, porém não mais que isto. Publicação italiana de 1992.

- *Física na Escola Secundária* (2 volumes) de Oswald H. Blackwood, Wilmer B. Herron e William C. Kelly retrata no capítulo do volume 1 o tema “*Forças entre moléculas*”, as diferenças entre gases líquidos e sólidos, um pouco de cristalografia, plasticidade e atração entre moléculas. Neste capítulo eles abordam a elasticidade e um pouco da construção da Lei de Hooke. Depois tensão superficial e capilaridade. Publicação na língua inglesa em 1958.
- *Física 3* (4 volumes) de Bukhovtsev, Hlimontovitch e Miakichev, é um livro russo de 1982, traduzido para a língua portuguesa de Portugal pela Editora Mir Moscovo; o referido aborda no capítulo 6: *Tensão Superficial dos líquidos* com subtítulos *Força de Tensão Superficial e Fenômenos da Capilaridade*. No capítulo 7 no tema *Corpos Sólido* aborda a visão microscópica desses corpos, bem como o problema das *deformações* indo para construção física e analítica da Lei de Hooke; em seguida trabalha a contextualização da plasticidade e fragilidade de corpos sólidos, dando maior significação a Física do Estado Sólido. Excelente livro para o Ensino Médio.
- *Mecânica dos Fluidos: experimento – teoria – cotidiano* de Hélio Bonadiman destinado ao Ensino Médio (antigo 2º grau) com ênfase **experimental**. Assim, no capítulo *Atividade 8* o autor fala dos Fenômenos de Superfícies e desenvolve atividades experimentais sobre Tensão Superficial, Superfícies Mínimas e Capilaridades. Depois, faz comentários complementares da compreensão teórica dos fenômenos abordados, inclusive de Agentes Umidificadores e Agentes Impermeabilizantes. Este é um livro brasileiro de 1989 e, nele também se encontra exercícios sobre as atividades aplicadas.
- *Mecânica*, de nível intermediário entre o Ensino Médio e o Ensino Superior, é o de *Sears & Zemansky* (1970), que aborda no capítulo 13 do volume 1 o tema Tensão Superficial envolvendo a Capilaridade. Tem uma descrição Física e Matemática muito apropriada ao Ensino Médio. Este livro é de uma publicação americana.

Observação.

Outros livros e endereços eletrônicos devem ser apreciados por estudantes, professores e interessados no tema. O objetivo aqui é mostrar uma lista mínima de títulos que encerram o tema tensão, tensão superficial e capilaridade.

APÊNDICE – B

Aqui desfila alguns exercícios resolvidos sobre temas abordados nesse livro.

1. (UFU) Em condições ambientes, a **densidade** do mercúrio é de aproximadamente 13 g/cm³. A massa desse metal, da qual um garimpeiro de Poconé (MT) necessita para encher completamente um frasco de meio litro de capacidade, é de:

a) 2.600 g b) 3 200 g c) 4 800 g d) 6 500 g e) 7 400 g

Solução:

Como a capacidade exigida no exercício está relacionada a unidade de medida LITRO, é conveniente, transformar a unidade da densidade de g/cm³, para g/mL uma vez que 1 cm³ é igual a 1 mL e, desse modo o resultado final pode ser expresso em grama. Usando uma regra de três para expressar a capacidade em mL, toma-se o fato de que 1L = 1000 mL e desse modo 0,5 L = 500 mL Como $d = m/V$ logo, a massa $m = d.V$ e, sendo assim, $m = 13 \times 500 = 6.500$ g, uma vez que a unidade de densidade está posta na forma g/mL Letra [d].

2. Uma solução aquosa foi preparada dissolvendo-se certa massa de hidróxido de sódio (NaOH) em 600 mL de água, originando um volume de 620 mL. Qual será a massa do soluto presente nessa solução? (Dados: **densidade** da solução = 1,19 g/mL; densidade da água = 1,0 g/mL)

a) 222,4 g b) 137,8 g c) 184,5 g d) 172,9 g e) 143,1 g

Solução:

Tem-se a massa do solvente (água) que é de 600 mL. O que se deseja obter é a massa do soluto (hidróxido de sódio). Desse modo, tem-se uma massa $M = m_1 + m_2$ e, sendo a massa m_1 da água, o que se deseja é m_2 e, dessa forma $M = 600 + m_2$ (em mL). Uma vez que a densidade será $d = M/V$ logo, $d = (600 + m_2)/620$ ou, $1,19 \times 620 = 600 + m_2$ e, daí $737,8 = 600 + m_2$ e finalmente $m_2 = 137,8$ g. Letra [b].

3. [Fuvest-SP]. Em uma indústria, um operário misturou, inadvertidamente, polietileno (PE), policloreto de vinila (PVC) e poliestireno (PS), limpos e moídos. Para recuperar cada um destes polímeros, utilizou o seguinte método de separação: jogou a mistura em um tanque contendo água (densidade = 1,00 g/cm³), separando, então, a fração que flutuou

(fração A) daquela que foi ao fundo (fração B). Depois, recolheu a fração B, secou-a e jogou-a em outro tanque contendo solução salina (densidade = $1,10 \text{ g/cm}^3$), separando o material que flutuou (fração C) daquele que afundou (fração D).

(Dados: **densidade** na temperatura de trabalho em g/cm^3 : polietileno = 0,91 a 0,98; poliestireno = 1,04 a 1,06; policloreto de vinila = 1,5 a 1,42)

As frações A, C e D eram, respectivamente:

- a. PE, PS e PVC
- b. PS, PE e PVC
- c. PVC, PS e PE
- d. PS, PVC e PE
- e. PE, PVC e PS

Solução:

Como a densidade da água é de $1,00 \text{ g/cm}^3$, então a fração que flutuou deve ser a que tem densidade menor que a da água, no caso, pelos dados foi o polietileno e, desse modo a fração A é o PE. Enquanto que, na solução salina, com densidade $1,10 \text{ g/cm}^3$, e dentre os materiais agora nessa solução salina o que flutua é o que densidade menor que a da solução salina, ou seja, o poliestireno, logo a fração B é o PS. Finalmente, o que fica no fundo da solução salina é o que tem densidade maior que $1,10 \text{ g/cm}^3$, ou seja, é o policloreto de vinila, logo a fração C é o PVC. Letra [a].

4. (Enem/2012) Um consumidor desconfia que a balança do supermercado não está aferindo corretamente a massa dos produtos. Ao chegar a casa resolve conferir se a balança estava descalibrada. Para isso, utiliza um recipiente provido de escala volumétrica contendo 1,0 litro d'água. Ele coloca uma porção dos legumes que comprou dentro do recipiente e observa que a água atinge a marca de 1,5 litro e também que a porção não ficara totalmente submersa, 1/3 de seu volume fora d'água. Para concluir o teste, o consumidor, com ajuda da internet, verifica que a **densidade** dos legumes, em questão, é a metade da densidade da água, onde, $\rho_{\text{água}} = 1 \text{ g/cm}^3$. No supermercado a balança registrou a massa da porção de legumes igual a 0,500 kg (meio quilograma). Considerando que o método adotado tenha boa precisão, o consumidor concluiu que a balança estava descalibrada e deveria ter registrado a massa da porção de legumes igual a

- a) 0,073 kg. b) 0,167 kg c) 0,250 kg d) 0,375 kg e) 0,750 kg

Solução:

A referência da escala volumétrica e seu conteúdo de 1,0 litro de água. Mas, ao colocar a porção de legumes a marca vai para 1,5 litros de água. Isso significa um aumento de 0,5 L com a introdução dos legumes. Mas, não foram todos os legumes que contribuíram para esse aumento de meio litro, apenas os legumes que afundaram, que corresponde a $\frac{2}{3}$ do total de legumes. Fazendo uma proporção para saber quanto de volume ocupa a parte que fica flutuando, usa-se o fato de que, SE $\frac{2}{3}$ do volume dos legumes está para 0,5 L, ENTÃO $\frac{1}{3}$ desse volume está para uma quantidade x equivalente ao volume de água que é o referencial de medida volumétrica para esse caso. Resolvendo essa proporção tem-se que o volume ocupado pelos $\frac{1}{3}$ dos legumes correspondem a 0,25 L e, desse modo, como o volume submerso é de 0,5 L, pode-se dizer que o volume total de legumes é 0,75 L. Dado que a densidade da água é $1,00 \text{ g/cm}^3$ e, a densidade média dos legumes é a metade do valor da densidade da água, pode-se considerar a densidade dos legumes como $0,50 \text{ g/cm}^3$ e, desse modo, a massa de legumes será dada pelo produto da densidade dos legumes pelo volume total deles (0,75 L). Como $0,75 \text{ L} = 750 \text{ mL} = 750 \text{ cm}^3$, e com isso, a massa total de legumes $M = 0,50 \times 750 = 375 \text{ g}$ que corresponde a 0,375 kg. Letra [d]

5. [ITA] uma mistura de metanol e água a 25°C apresenta o volume parcial molar de água igual a $17,8 \text{ cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$ e o volume parcial molar do metanol igual a $38,4 \text{ cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$. Com base nestas informações e sendo a **massa específica** do metanol de $0,791 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ e a da água igual a $1,000 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, assinale a opção CORRETA do volume total (em cm^3) quando se adicionam 15 cm^3 de metanol em 250 cm^3 de água nessa temperatura.

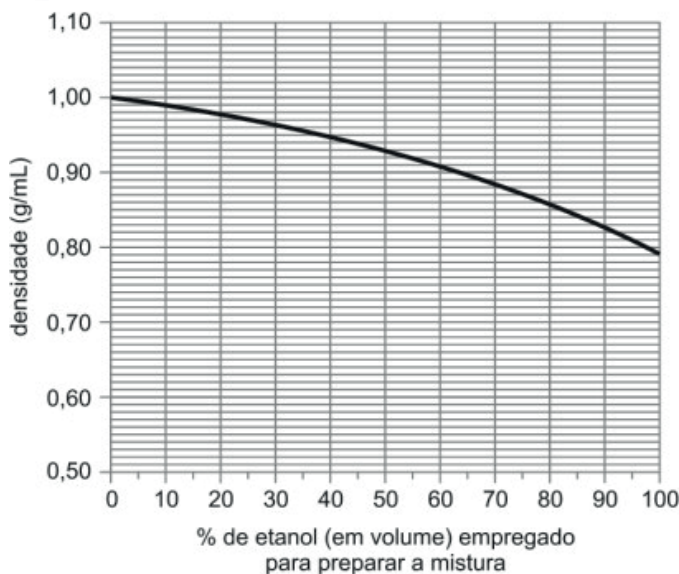
- a) 250 b) 255 c) 262 d) 270 e) 280

Solução:

Primeiro, observa-se que $0,791 \text{ g}$ de metanol ocupa 1 cm^3 e, dessa forma, 15 cm^3 deve ser ocupado por uma massa de $11,865 \text{ g}$ (regra de três). O mesmo cálculo se faz para a água, ou seja, $1,000 \text{ g}$ de água ocupa 1 cm^3 então, 250 g deve ser ocupado por uma massa de 250 g de água. Segundo: a água é H_2O e isso dá a ela uma massa molar $M = 2 + 16 = 18$ Ou $M = 18 \text{ g}$ e desse modo, pode-se calcular a razão entre essa massa molar da água e o seu volume molar, ou seja, 18 g dividido por $17,8 \text{ cm}^3$ que resulta em $1,011235 \text{ g/cm}^3$. Do mesmo modo para o metanol CH_4O que tem massa molar $M = 12 + 4 + 16 = 32$. Ou $M = 32 \text{ g}$ e desse modo, pode-se calcular a razão 32 g dividido por $38,4 \text{ cm}^3$ que resulta no valor de $0,833333$. Terceiro, agora, sabendo-se da massa de água (250 g), pode-se calcular o volume dessa massa a partir da condição de igualdade entre a densidade desse

corpo de 250 g e a densidade molar desse mesmo corpo, ou seja, para a água, $250/V = 1,011235$ ou, o volume de água será $V_A = 250 / 1,011235 = 247,2 \text{ cm}^3$. Do mesmo modo, se executa para o metanol que tem massa molar de 11,865 g e, dessa forma, $11,865 / V = 0,833333$ ou, o volume de metanol será $V_M = 11,865 / 0,833333 = 14,24 \text{ cm}^3$. Quarto, o volume total é $V = V_A + V_M = 247,2 \text{ cm}^3 + 14,24 \text{ cm}^3 = 261,44 \text{ cm}^3$, aproximadamente 262 cm^3 . Letra [c].

6. (FUVEST) Água e etanol misturam-se completamente, em quaisquer proporções. Observa-se que o volume final da mistura é menor do que a soma dos volumes de etanol e de água empregados para prepará-la. O gráfico a seguir mostra como a **densidade** varia em função da porcentagem de etanol (em volume) empregado para preparar a mistura (densidades medidas a 20 °C).



Se 50 mL de etanol forem misturados a 50 mL de água, a 20 °C, o volume da mistura resultante, a essa mesma temperatura, será de, aproximadamente,

- a) 76 mL b) 79 mL c) 86 mL d) 89 mL e) 96 mL

Solução:

Fazendo uma interpretação analítica do gráfico, observa-se que, quando não há álcool na mistura a densidade (pico no lado esquerdo) da água é 1,00 g/mL e, quando não

há água, ou seja, existe 100 % de álcool, no gráfico, (lado esquerdo) a curva toca no ponto 0,79 que é a densidade do álcool, 0,79 g/mL. Para se calcular a massa de álcool, dado que seu volume é de 50 mL, basta multiplicar a densidade do álcool por esse volume, ou seja, a massa de álcool será $50 \times 0,79 = 39,5$ g. Do mesmo modo, a massa de água será dada pelo produto de sua densidade por seu volume, ou seja, massa de água será $50 \times 1,00 = 50$ g e, com isso, a massa total é a soma $M = 39,5 + 50 = 89,5$ g. Mas, o percentual de álcool empregado para preparar a mistura é de 50 % do volume total empregado e, nessas condições, toma-se o valor 50 % na base do gráfico e sobe a linha até ela tocar a curva e, quando tocar a curva, acompanha-se a linha até a ordenada de densidade observando que o valor nesse ponto é 0,93 g/mL. Agora, com esse valor e a massa M encontra-se o volume V dado pela razão entre a M e a densidade, ou seja, $V = 89,5 \text{ g} / 0,93 \text{ g/mL}$, cujo resultado é dado por $V = 96,23 \text{ mL}$, ou aproximadamente 96 mL. Letra [e]

7. Em 6 m^3 de óleo há 47 kN de peso. Nessas condições determine o **peso específico**, **massa específica** e **densidade** do fluido.

Solução:

O peso específico δ é a razão entre o peso (47 kN) e o volume (6 m^3) e, isso corresponde a 7,83333333 ou $\delta = 7,8 \text{ kN/m}^3$. Sabendo-se que $\delta = pg$, com $g = 9,8 \text{ m/s}^2$, logo, a massa específica p será dada pela razão entre o peso específico e a aceleração da gravidade, ou seja, $p = 7,8 / 9,8$ ou $p = 0,78 \text{ kN/m}^3$. Enquanto que a densidade (ver a terceira equação em equações 2,5) é a razão entre o peso específico do corpo ($\delta = 7,8 \text{ kN/m}^3$) e o peso específico da água que é $pg = 1000 \text{ kg/m}^3 \times 9,8 \text{ m/s}^2 = 9.800 \text{ N/m}^3 = 9,8 \text{ kN/m}^3$ e, desse modo a densidade será $7,8 \text{ kN/m}^3$ dividido por $9,8 \text{ kN/m}^3$ que resulta $\delta = 0,80$ absoluto.

8. Uma substância com massa de 1,8 toneladas, ocupa um volume de 3 m^3 . Determine a **massa específica**, o **peso específico** e o **peso relativo** dessa substância.

Solução:

A massa de 1,8 t corresponde a 1800 kg e, dessa forma a massa específica será dada por $1800 \text{ kg} / 3 \text{ m}^3$ ou $\rho = 600 \text{ kg/m}^3$. Enquanto que o peso desse corpo é $P = mg$ com $g = 9,8 \text{ m/s}^2$, ou seja, $P = 1800 \times 9,8 \text{ N} = 17.640 \text{ N}$, sendo assim, $d = 17.640 \text{ N} / \text{m}^3 = 5880 \text{ N/m}^3$. Já, para encontrar o peso específico relativo, primeiro calcula-se o peso específico da água que é $pg = 1000 \text{ kg/m}^3 \times 9,8 \text{ m/s}^2 = 9.800 \text{ N/m}^3$ e, daí o peso específico relativo dessa substância será 17.640 N/m^3 dividido por $9.800 \text{ N/m}^3 = 1,8$ em valor absoluto.

9. Calcule a intensidade da força exercida pela **pressão** de 1 atm de ar no piso de sua sala de 9 m².

Solução:

Pressão é a razão entre a força e a área, daí $F = P.A$, onde $P = 1 \text{ atm} = 1,01 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ e, com isso $F = (1,01 \times 10^5) \times 9$ o que equivale, aproximadamente a 10^6 N

10. Mostre que a relação entre a deformação específica do material (s) e a tensão (e) é dada através do Módulo de Elasticidade do Material também chamado de Módulo de Young.

Solução:

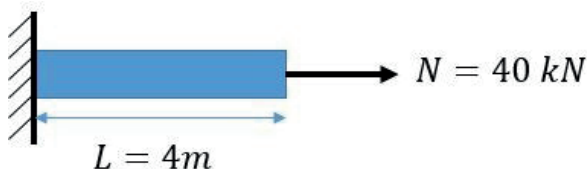
Vimos na equação 1.1 que:

$$\frac{F/A}{\Delta L/L} = E \quad \text{mas da Eq. 1.3} \quad \sigma = \frac{F}{A} \text{ (tensão)} \quad e \quad \varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \text{ (um \%)}$$

$$\text{Daí} \quad \frac{\sigma}{\varepsilon} = E \quad \text{ou seja} \quad \sigma = \varepsilon E \quad (E \text{ Módulo de Young})$$

Que é a LEI DE HOOKE

11. Imagine que se tenha uma barra de 4 m de comprimento e área de 100 mm², ou seja, $A = 100 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ ligada a uma parede e sendo **tracionada** para direita por uma força de 40 kN (40.000 N) conforme figura abaixo e que, essa barra não pode ultrapassar o limite de 1 cm para não causar danos. Sabendo-se que o Módulo de Young é de 200 GP_a (200 x 10⁹ P_a), nas condições em que ao longo da barra a aplicação será uniforme, qual é a variação de comprimento por ela sofrida?



Solução:

A força F aplicada na superfície com área A , gera $F = N$ (força normal) e, desse modo na equação de tensão aparece agora a expressão equivalente N / A , equivalente a F / A , enquanto que para a variação percentual e nada muda, mas, vou chamar a variação de comprimento por α e, desse modo, $\alpha = \Delta L$ e, sendo assim, $\varepsilon = \alpha/L$ e o desejo é calcular o valor de alfa. Da Lei de Hooke, tem-se que:

$$\sigma = E\varepsilon \text{ que fica } \frac{N}{A} = E \frac{\alpha}{L} \text{ daí } \alpha = \frac{L \cdot N}{EA}$$

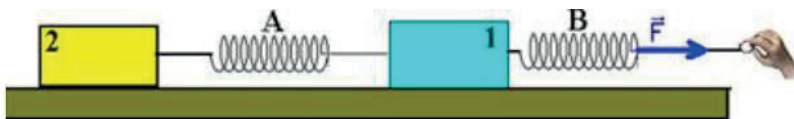
$$\alpha = \frac{(4)(40000)}{(200 \times 10^9)(100 \times 10^{-8})} = \frac{16 \times 10^3}{2 \times 10^7} = 8 \times 10^{-4} \text{ m} = 0,08 \text{ cm} < 1 \text{ cm}$$

12. Um cabo de aço é **tracionado** de 14 m até 14,18 m. Determine a variação de comprimento α e a percentual de deformação e sofrida por esse cabo.

Solução:

Tem-se que $\alpha = \Delta L = 14,18 - 14,00 = 0,18 \text{ m}$ enquanto o percentual de deformação será dado por $\varepsilon = (\alpha / L) \times 100\% = (0,18 / 14) \times 100\% = 1,3 \%$

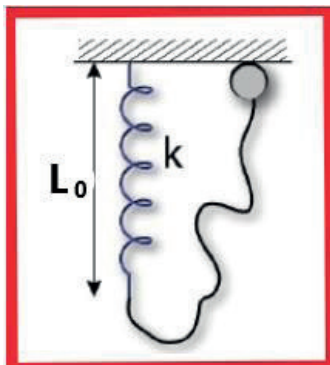
13. [UFB] Entre dois blocos 1 e 2 de massas $m_1 = 12 \text{ kg}$ e $m_2 = 8 \text{ kg}$ existe uma mola ideal A. Os dois blocos estão apoiados sobre um plano horizontal sem atrito. O bloco 1 é puxado por uma força **F**, constante, horizontal e paralela ao plano por meio de outra mola ideal B, idêntica à mola A. Calcule a relação x_A/x_B entre as **deformações** das molas A e B, depois que o sistema entrou em movimento com aceleração constante **a**.



Solução

Traçando o sistema de forças para os corpos 1 e 2, e isolando o corpo 2, tem-se que a tração ($T = m_2 \times a$), enquanto que para o corpo 1, tem-se ($F - T = m_1 \times a$) uma vez que, das condições físicas apresentadas as trações nos corpos são iguais. E, a aceleração “a” é mesma para os dois corpos. Dessas duas equações, que formam um sistema, obtém-se que, ($T = 8 \times a$) enquanto ($F - T = 12 \times a$) e daí ($F = 20 \times a$). Com isso, tem-se duas equações: ($T = 8 \times a$) e dessa equação ($k x_A = 8a$) e daqui $x_A = 8a / k$. Similarmente, a outra equação encontrada, ($F = 20 \times a$) torna-se ($k x_B = 20a$) e daqui $x_B = 20a / k$. Desse modo, a relação pedida entre $x_A / x_B = 8ak / 20ak = 8 / 20 = 2 / 5$.

14. Larga-se uma bola de massa m da posição mostrada na figura abaixo. Sabendo-se que a mola tem comprimento L_0 e o fio tem comprimento $2L_0$ a questão é. Qual o comprimento máximo de **alongamento** da mola?

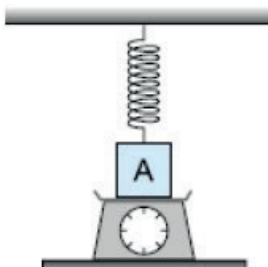


Solução:

Esse é um exercício que envolve a conservação de **energia**. Observe que a configuração da bola faz com que a mesma armazene uma energia potencial gravitacional mgH que, quando cair transforma-se em energia potencial elástica com referência a atividade da mola e, desse modo, a $mgH = \frac{1}{2} kx^2$, onde $H = L_0 + 2L_0 + x = 3L_0 + x$, onde x é o alongamento da mola. Com isso, $mg(3L_0 + x) = \frac{1}{2} kx^2$ que, numa arrumação matemática tem-se uma equação do segundo grau na forma $kx^2 - 2mgx - 6mgL_0 = 0$, resolvendo essa equação e, arrumando seus termos tem-se como resposta:

$$x = \frac{mg}{k} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{6kL_0}{mg}} \right)$$

15. A mola da figura abaixo tem constante elástica $k = 20 \text{ N/m}$ e encontra-se alongada de 20 cm ($0,2 \text{ m}$) sob a ação do corpo A cujo peso é $5,0 \text{ N}$. Nessa situação de **equilíbrio**, determinar a indicação da balança, graduada em Newtons.



Solução:

Nessa configuração de equilíbrio há três forças em jogo. A força peso, para baixo está sendo equilibrada pelas forças de reação da balança (que é a que o exercício pede) e a força elástica da mola dada por $k \cdot x = 20 \times 0,20 = 4,0$ N. Desse modo, tem-se a equação dada por $P = F_B + F_E$ ou $5,0 = F_B + 4,0$ resolvendo $F_B = 1,0$ N.

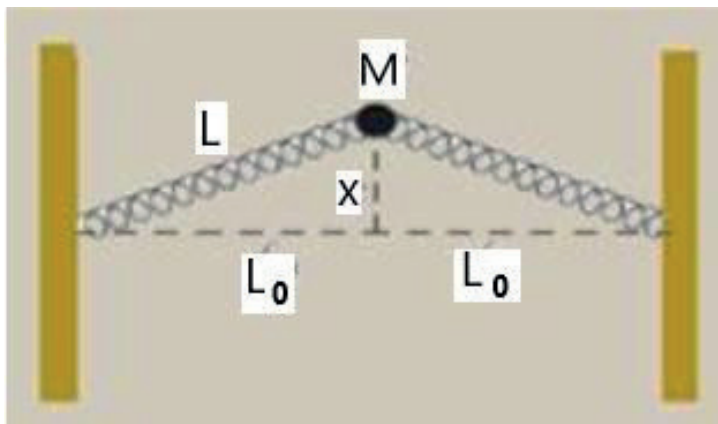
16. (UNICAMP) Nas cenas dos filmes e nas ilustrações gráficas do Homem-Aranha, a espessura do cabo de teia de aranha que seria necessário para sustenta-lo é normalmente exagerada. De fato, os fios de seda da teia de aranha são materiais extremamente resistentes e elásticos. Para deformações ΔL relativamente pequenas, um cabo feito de teia de aranha pode ser aproximado por uma mola de constante elástica k dada pela fórmula ($K=10^{10} A/L$), onde L é o comprimento inicial e A é a área da seção transversal do cabo. Para os cálculos abaixo, considere a massa do Homem-Aranha $M = 70$ kg. Calcule a área A da seção transversal do cabo de teia de aranha que suportaria o peso do Homem-Aranha com uma deformação de 1,0 % do comprimento inicial do cabo. ($g=10$ m/s²).



Solução:

Tem-se nesse caso que $F = P$, onde, pelos dados do exercício $P = mg = 70 \times 10 = 700$ N e, disso vem que $F = 700$ N, mas, $F = k(\Delta L)$ daí $\Delta L = 700$, mas no exercício também é dado que $\varepsilon = 1\%$, como $\varepsilon = \Delta L / L$ logo $\Delta L = \varepsilon L$, ou seja, $\Delta L = (1\%)L = 0,01L$ com isso, $k(0,01L) = 700$ ou $kL = 7 \times 10^4$ e, outro dado do exercício é que $k = 10^{10} A / L$ e disso vem que $(10^{10} A / L)L = 7 \times 10^4$ ou $10^{10} A = 7 \times 10^4$ resolvendo $A = 7 \times 10^{-6}$ m², sabendo que $1 \mu = 10^{-6}$, pode-se escrever $A = 7 \mu\text{m}^2$.

17. (ITA-SP) Sobre uma mesa sem atrito, uma bola de massa M é presa por duas molas alinhadas, de constante de mola k e comprimento natural L_0 , fixadas nas extremidades da mesa. Então, a bola é deslocada a uma distância x na direção perpendicular à linha inicial das molas, como mostra a figura, sendo solta a seguir. Obtenha a aceleração da bola, usando a aproximação $(1 + a)^a \approx 1 + a \cdot a$



- a) $a = -kx/M$ d) $a = -kx^3/2M L_0$
 b) $a = -kx^2/2M L_0$ e) $a = -kx^3/M L_0^2$
 c) $a = -kx^3/M L_0$

Solução:

Como não existe atrito o movimento da bola de massa M é simétrico com relação ao eixo $2L_0$. O comprimento L e o comprimento x fazem entre si um ângulo θ . Devido a simetria do exercício, θ esse ângulo está a esquerda e a direita. Desse modo, a estrutura vetorial que compõe essa figura nos diz que há vetorialmente duas forças elásticas F_E que obedecem a Lei de Hooke e, a partir da bola, apontam para baixo com intensidades $(F_E \cos \theta)$ a soma dessas duas forças dar a força resultante $(F_R = 2 F_E = 2 F_E \cos \theta)$. Da configuração tem-se que $(\cos \theta = x / L)$ enquanto $[F_E = k \Delta x = k (L - L_0)]$ e, assim $[F_R = 2 k (L - L_0) (x / L)]$, ou seja, devido a condição física da mola que se **restaura** no seu movimento simétrico em relação ao ponto M da figura dada, logo, $\{F_R = - [(2 k x) / L] (L - L_0)\}$. Agora, olha-se para o triângulo retângulo com hipotenusa L e lado x e L_0 onde tem-se

$$L^2 = x^2 + L_0^2 \quad \text{daí} \quad L = \sqrt{x^2 + L_0^2} \quad L = L_0 \sqrt{1 + (x/L_0)^2}$$

$$\text{Disso vem que } L_0 = \frac{L}{\sqrt{1 + (x/L_0)^2}} \quad \text{daí} \quad L - L_0 = L \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + (x/L_0)^2}} \right]$$

Com isso:

$$F_R = -\frac{2kx}{L} L \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + (x/L_0)^2}} \right] = -2kx \left[1 - (1 + (x/L_0)^2)^{-1/2} \right]$$

Usando a aproximação dada:

$$F_R = -2kx \left[1 - \left(1 - \frac{1}{2} \frac{x^2}{L_0^2} \right) \right] = -\frac{kx^2}{L_0^2} \quad \text{como} \quad F_R = Ma$$

$$\text{Finalmente} \quad a = -\frac{kx^3}{ML_0^2} \quad \text{que é a letra [c]}$$

18. (UECE) Uma lâmina de barbear das antigas flutua quando deitada cuidadosamente sobre a superfície da água contida em um copo. Esse fenômeno é explicado por uma causa imediata que é

- a. a pequena polaridade das moléculas da água.
- b. a tensão superficial da água.**
- c. a simetria das ligações de hidrogênio.
- d. o princípio da ação e da reação.
- e. nda.

19. (PUC-RS) A tensão superficial da água explica vários fenômenos, como o da **capilaridade**, a forma esférica das gotas de água e o fato de alguns insetos poderem andar sobre a água. A alta tensão superficial da água é uma consequência direta:

- a. da sua viscosidade.
- b. do seu elevado ponto de fusão.
- c. do seu elevado ponto de ebulição.
- d. das atrações intermoleculares.**
- e. das ligações covalentes entre os átomos de “H” e “O”.

20. Um tubo **capilar** com 0,88 mm de diâmetro interno é mergulhado numa cuba com glicerina, e a glicerina sobe 23,3 mm no tubo, sabendo-se que a glicerina tem massa específica de 1200 kg/m³, qual sua tensão superficial, dado que $\theta = 0^\circ$ e, $g = 9,8 \text{ m/s}^2$?

Solução:

O diâmetro é 0,88 mm, logo $r = 0,44 \text{ mm} = 4,4 \times 10^{-4} \text{ m}$; $h = 23,3 \text{ mm} = 2,33 \times 10^{-2} \text{ m}$;
 $\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$; $\theta = 0^\circ$ e, disso vem que $\cos \theta = 1$. Feito isso, e sabendo-se que:

$$h = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho g r} \quad \text{daqui} \quad \gamma = \frac{\rho g h r}{2 \cos \theta} = \frac{1200 \times 9,8 \times 2,33 \times 10^{-2} \times 4,4 \times 10^{-4}}{2 \times 1}$$
$$\gamma = 6,0 \times 10^{-2} \text{ N/m}$$

21. A **tensão superficial** da água a 21°C é $0,0726 \text{ N/m}$. Determine o diâmetro máximo que deve ter uma gota de água para que sua pressão interna supere a externa em 690 N/m^2 .

Solução:

$$h = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho g r} \quad \text{daqui} \quad r = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho g h} = \frac{2\gamma \cos \theta}{P} = \frac{2\gamma}{P}$$
$$r = \frac{2 \times 0,0726}{690} = 2,1 \times 10^{-4} \text{ m} = 0,21 \times 10^{-3} \text{ m} = 0,21 \text{ mm}$$
$$\text{Logo, } D = 2r \text{ daí } D = 2 \times 0,21 \text{ ou } D = 0,42 \text{ mm}$$

22. Um **surfactante** é uma substância que atua sobre outra para alterar a:

- a. Osmolaridade.
- b. Tensão superficial.**
- c. Eletroforese.
- d. Viscosidade.
- e. Pressão osmótica.

23. Os sprays utilizados em partidas de futebol têm formulações bem variadas, mas basicamente contêm água, butano e um surfactante. Quando essa mistura deixa a embalagem, forma-se uma espuma branca que o árbitro utiliza para marcar as posições dos jogadores. Do ponto de vista químico, essas informações sugerem que a espuma estabilizada por certo tempo seja formada por pequenas bolhas, cujas películas são constituídas de água e

- a. surfactante, que aumenta a tensão superficial da água.
- b. butano, que aumenta a tensão superficial da água.

c. **surfactante, que diminui a tensão superficial da água.**

d. butano, que diminui a tensão superficial da água.

24. (PUC-RS) A tensão superficial da água explica vários fenômenos, como o da capilaridade, a forma esférica das gotas de água e o fato de alguns insetos poderem andar sobre a água. A **alta tensão superficial** da água é uma consequência direta:

a. da sua viscosidade.

b. do seu elevado ponto de fusão.

c. do seu elevado ponto de ebulição.

d. **das atrações intermoleculares.**

e. das ligações covalentes entre os átomos de “H” e “O”.

isso porque:

A Tensão Superficial é mais intensa nos líquidos que possuem altas forças intermoleculares, pois é pela força de coesão que esse fenômeno é causado. As forças intermoleculares são um jogo de atração entre os átomos que formam uma molécula. São elas que definem as propriedades como ponto de fusão e ebulição. Elas são de três tipos:

- **Dipolo-induzido:** acontece entre moléculas apolares e polares. (força fraca)
- **Dipolo-dipolo:** acontece entre moléculas polares. (força média)
- **Ligação de Hidrogênio:** acontece em moléculas que possuem H ligado a F, O ou N. (força alta), como no caso da água, por exemplo.

25. (UNIFESO/2014) Os agentes **tensoativos** ou surfactantes são compostos químicos que têm a propriedade de reduzir a tensão superficial ou de influenciar uma camada que separa duas fases em contato. Na prática, observa-se que, mesmo presentes em pequenas concentrações, tensoativos como sabões e detergentes diminuem consideravelmente a tensão superficial da água. Isto se deve à grande afinidade existente entre esses compostos e as interfaces, fenômeno que tem relação direta com o fato de parte da molécula de um surfactante apresentar caráter polar e outra parte exibir caráter apolar. De acordo com as considerações do texto, assinale a alternativa que indica a fórmula estrutural que representa um agente tensoativo.

a. $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_6\text{CH}_3$

b. $\text{H}_2\text{C} = \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH}_3$

c. $\text{H} - \text{COOH}$

d. **$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COONa}$**

e. $\text{C}_6\text{H}_5 - \text{CH}_3$

Solução:

De um modo geral, quanto maior uma cadeia carbônica maior o caráter apolar. Dessa forma, a opção **D** apresenta uma extremidade apolar (representada pela grande cadeia carbônica) e uma extremidade polar, representada pelo grupo funcional COO^-Na^+ .

26. A tensão superficial do clorofórmio é de $27,1 \times 10^{-3} \text{ N/m}$. Quantos joules (**trabalho realizado**) são necessários para aumentar a área superficial do clorofórmio de 50 cm^2 ?

Solução:

Sabendo-se que $1 \text{ cm}^2 = 10^{-4} \text{ m}^2$ logo $50 \text{ cm}^2 = 50 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 5,0 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ e, a tensão superficial $\gamma = 27,1 \times 10^{-3} \text{ N/m}$, como $W = \gamma A = (27,1 \times 10^{-3})(5,0 \times 10^{-3}) = 135,5 \times 10^{-6} \text{ J}$ que pode ser escrito como $W = 1,4 \times 10^{-4} \text{ J}$.

27. A densidade do mercúrio a 25°C é dada por $\rho = 13,53 \text{ g/cm}^3$ e a tensão superficial desse material é $\gamma = 0,484 \text{ N/m}$. Qual será a **depressão** capilar do mercúrio em um vidro fino de raio interno $r = 1,0 \text{ mm}$, admitindo $\theta = 180^\circ$?

Despreze a densidade do ar

Solução:

Desprezando a densidade do ar, o que faz com que usemos apenas a densidade dada para o mercúrio e não a diferença entre as densidades, e sabendo que $r = 1,0 \text{ mm} = 10^{-3} \text{ m}$; assim como $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ e $\rho = 13,53 \text{ g/cm}^3 = 13,53 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, onde se coloca todas as unidades no sistema MKS, com $(\cos \theta = -1)$ e, usando a expressão físico-matemática do contexto dos estudos, tem-se que.

$$h = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho g r} = \frac{(2)(0,484)(-1)}{(13,53 \times 10^3)(9,8)(10^{-3})} = -\frac{9,68 \times 10^{-2}}{13,2594} = -0,73 \text{ cm}$$

28. Calcular a diferença de pressão em uma gota de mercúrio que tem tensão superficial de $0,484 \text{ N/m}$ se o raio for de $0,001 \text{ mm}$.

Solução:

Dado que $r = 0,001 \text{ mm} = 10^{-3} \text{ mm} = 10^{-6} \text{ m}$ e $\gamma = 0,484 \text{ N/m}$ e sabendo-se que:

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{r} = \frac{2 \times 0,484}{10^{-6}} = 9,68 \times 10^6 \approx 10^7 P_a$$

29. Em um tubo de vidro fino, a água sobe, numa ascensão capilar, de 3,2 cm quando a 20°C. Sabendo-se que, $\rho = 1,00 \text{ g/cm}^3$ e $\gamma = 7,3 \times 10^{-2} \text{ N/m}$, $\theta = 0^\circ$ e $g = 9,8 \text{ m/s}^2$, determine o diâmetro desse tubo.

Solução:

Dado $\rho = 1,00 \text{ g/cm}^3 = 10^3 \text{ kg/m}^3$ e, $h = 3,2 \text{ cm} = 3,2 \times 10^{-2} \text{ m}$, disso vem que

$$h = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho g r} \quad \text{daqui} \quad r = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho g h} = \frac{(2)(7,3 \times 10^{-2})(1)}{(10^3)(9,8)(3,2 \times 10^{-2})}$$

$$\text{Daí } r = 0,5 \times 10^{-3} \text{ m} = 0,05 \text{ cm} \quad \text{daqui } D = 0,1 \text{ cm}$$

30. Uma bolha de sabão com 0,50 cm de diâmetro se mantém estável por ser sua pressão interna 0,01 kN/m² maior que a externa. Calcule a tensão superficial da película de sabão.

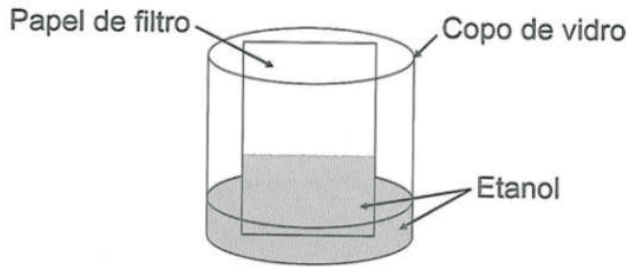
Solução:

Como diâmetro é 0,50 cm, logo o raio é 0,25 cm, ou seja, $r = 0,25 \times 10^{-2} \text{ m}$; enquanto que $\Delta P = 0,01 \text{ kN/m}^2 = 10 \text{ N/m}^2$. Sabendo-se que:

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{r} \quad \text{daqui} \quad \gamma = \frac{(\Delta P)(r)}{2} = \frac{(10)(0,25 \times 10^{-2})}{2} = 0,0125 \text{ N/m}$$

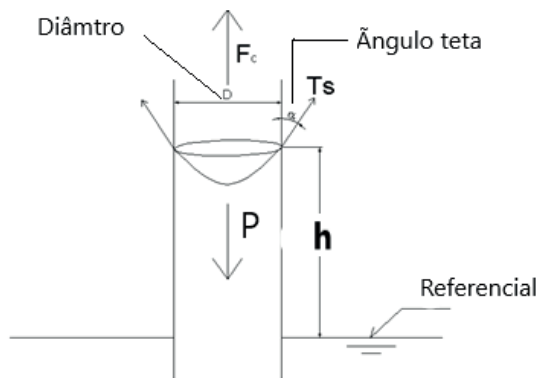
31. Um experimento simples, que pode ser realizado com materiais encontrados em casa, é realizado da seguinte forma: adiciona-se um volume de etanol num copo de vidro, e, em seguida, uma folha de papel. Com o passar do tempo, observa-se um comportamento peculiar: o etanol se desloca-se sobre a superfície do papel, superando a gravidade que o atrai em sentido oposto como mostra a imagem. Para parte dos estudantes, isso ocorre por causa da absorção do líquido pelo papel. Do ponto de vista científico, o que explica o movimento do líquido é:

- a. evaporação do líquido.
- b. diferença de densidades.
- c. reação química com o papel.
- d. capilaridade nos polos do papel.**
- e. resistência ao escoamento do líquido.



32. Da figura abaixo, mostre que:

$$h = \frac{4T_s \cos \theta}{\delta D}$$



Solução:

Usando a condição de equilíbrio estático tem-se: a soma das forças que atuam no eixo-y é igual a zero. Nessas condições, observando a figura dada tem-se que $P = F_c$. Onde $P = mg$ ou $P = \rho Vg$ daqui $P = \rho g(\pi r^2 h)$ sabendo-se que $\delta = \rho g$ tem-se que $P = \delta(\pi r^2 h)$ e, usando o fato de que o diâmetro $D = 2r$ e daqui $r = D / 2$ temos que $P = \delta[\pi (D^2 / 4) h]$. Por outro lado, a tensão superficial $T_s = F_c / L$ daqui $F_c = T_s L$ e, da configuração dada tem-se que $F_c = (T_s \cos \theta)L$, como $L = 2\pi r$ logo $F_c = (2 \pi r)T_s \cos \theta$ uma vez que $r = D / 2$ fica-se assim com $F_c = [2 \pi (D / 2)]T_s \cos \theta$, Daqui, $F_c = \pi D T_s \cos \theta$. Com isso, a expressão do peso igual a força capilar, ou $P = F_c$ se torna¹⁰:

$$\delta \frac{\pi D^2 h}{4} = \pi D T_s \cos \theta \quad \text{ou} \quad \delta D h = 4 T_s \cos \theta \quad \therefore \quad h = \frac{4 T_s \cos \theta}{\delta D}$$

10. Fato muito usado na engenharia civil

33. Porque alguns insetos “andam” por sobre a água?

Solução:

É a força de coesão da água que a permite sustentar coisas mais densas do que ela. Assim, esses animais conseguem caminhar ou repousar sobre a água porque há pelos com substâncias gordurosas em suas patas. Como a gordura é apolar e esses insetos são muito leves, a força de coesão da água (polar) não pode ser rompida ou superada. Isso também explica o porquê de objetos pequenos (como cliques de papel), não afundarem quando colocados horizontalmente sobre a água.

34. O que é imiscibilidade?

Solução:

É a propriedade na qual dois líquidos não se misturam, como água e óleo, pois, as duas substâncias têm tensão superficial muito diferentes entre si, uma vez que uma é polar e a outra não polar.

35. O que é um surfactante pulmonar?

Solução¹¹:

O pulmão pode ser visto como uma coleção de bolhas, essa condição é inerentemente instável. Em virtude da tensão superficial do líquido que reveste os alvéolos desenvolvem-se forças relativamente grandes que tendem a colapsar os alvéolos. Felizmente algumas das células que revestem os alvéolos secretam uma substância chamada surfactante, que diminui a tensão superficial da camada de revestimento alveolar. O surfactante pulmonar é um líquido que reduz de forma significativa a tensão superficial dentro do alvéolo pulmonar, prevenindo o colapso durante a expiração. Consiste em 80% de fosfolípidos, 8% de lípidios e 12% de proteínas. A tensão superficial é a força que atua através de uma linha imaginária na superfície do líquido. Ela se origina porque as forças de atração entre as moléculas adjacentes do líquido são muito mais fortes do que aquelas entre o líquido e o gás, resultando em diminuição da superfície líquida, gerando uma pressão dentro do alvéolo.

11. Disponível em: <https://interfisio.com.br/surfactante-pulmonar/>

REFERÊNCIAS

AMALDI, Ugo. **Imagens da física**. (Tradução de Giuseppe Ferrari do original Immagini della Fisica, Copyright © 1992). São Paulo: Scipione, 1995.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA), Revista; Saúde e Economia: **Glaucoma**. Ano I, Edição Nº 2, Novembro de 2009. Disponível em <<http://200.214.130.94/rebrats/publicacoes/Saude%20e%20Economia.pdf>>. Acesso em 05 de mai. de 2014.

BLACKWOOD, Oswald H.; HERRON, Wimer B. KELLY, William C. **Física na escola secundária**. (2 volumes), vol. 1 (Tradução de José Leite Lopes, Jayme Tiomno do original High School Physics, Copyright © 1958). Rio de Janeiro: Fundo de Cultura SA. 1ª Edição brasileira em 1958.

BONADIMAN, Helio. **Mecânica dos fluidos**: experimento – teoria – cotidiano. Ijuí, RS: UNIJUÍ, 1969 (Coleção: ensino de 2º grau).

BUKHOVTSEV, B; KLIMONTOVITCH, In e MIAKICHEV, G, **Física 3**. (4 volumes). (Tradução do original, de 1982, por K. Asryantz da língua russa). Lisboa/Portugal: Mir Moscovo, 1987.

DAVIDOVITS, Paul. **Physics in biology and medicine**. 3rd ed. (Complementary science series). Academic Press: United States of America, 2008. Disponível em <http://server2.phys.uniroma1.it/doc/giansanti/FISICA_TO_2010/Davidovits%20P.%20Phy%20sic%23553671.pdf>. Acesso em 06 de jul. de 2007.

DANTAS, Luiz Bezerra (2009). **Glaucoma a doença silenciosa**; apostila da Editora INESP, produzida pela Assembleia Legislativa do Ceará, disponível em <<file:///C:/Users/Mario/Downloads/glaucoma.pdf>>. Acesso em 20 de mai. de 2014.

DE PAULA, et. al. **A Química inorgânica no planejamento de fármacos usados no controle da hipertensão**. Revista Química Nova. Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola, n. 6, julho de 2005.

Definition of interface Liquid-gas and liquid-liquid interfaces (surface tension, spreading, adsorption and orientation at interfaces). Sem autoria [2016?]. Disponível em <<http://dragon.unideb.hu/~kolloid/colloid/lectures/chembsc/lecture%2003.pdf>>. Acesso em 24 de mar. de 2016.

FEITOSA, Laércio. **Movimento das águas no solo** (percolação). Texto disponível em <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAA0GIAB/movimento-das-aguas-no-solo-percolacao>>. Acesso em 16 de abr. de 2016.

FERREIRA, João Paulo Medeiros. **Tensão superficial** – sua natureza e efeitos. Escola Superior de Biotecnologia. Universidade Católica Portuguesa. Porto/Portugal, s/d. Disponível em <<http://www.spq.pt/magazines/BSPQ/618/article/30001960/pdf>>. Acesso em 24 de mar. de 2016.

GAMA, Rogério M. Saldanha. **Fundamentos de mecânica dos fluidos**. Rio de Janeiro: UERJ / 2012.

GOMES, Maria Helena Rodrigues. **Mecânica dos fluidos** (apostila). Professora do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Disponível em <<http://www.ufjf.br/engsanitariaeambiental/files/2012/09/Apostila-de-Mec%C3%A2nica-dos-Fluidos.pdf>>. Acesso em 24 de mar. de 2016.

KIBBLE, Thomas Walter Bannerman. **Mecânica clássica**. (Tradução por A. L. da Rocha Barros e Redondo do original Classical Mechanics, Copyright 1966) São Paulo: Polígono, 1970

- MOTA, Carlos Bolli. **Biomecânica**: ossos. Texto em Power Point da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, do Laboratório de Biomecânica, s/d. disponível em <<http://www.ufsm.br/labiomec/biomecanica/ossos>>. Acesso em 16 de abr. de 2016.
- OKUNO, Emico, CALDAS, Iberê e CHOW, C. **Física para ciências biológicas e biomédicas**. São Paulo: HARBRA, 1982.
- OTTONI, Andréia B.; SOARES, R. G.; IRALA, Luiz E. D.; SALLES, Alexandre A.; LIMONGI, Orlando. **Mensuração da tensão superficial de diferentes substâncias utilizadas na terapia endodôntica**. Revista Stomatós, v. 13, n. 24, p. 11-20, jan./jun de 2007. Disponível em <<http://www.redalyc.org/pdf/850/85002403.pdf>>. Acesso em 30 de jan. de 2016.
- PINHO JÚNIOR, et. al. **Estudo comparativo da frequência cardíaca e da pressão arterial, antes e após exercício aeróbico no solo e na água em idosos do “projeto vida ativa na terceira idade**. TCC, apresentado ao Curso de Fisioterapia do Centro de Saúde da Universidade do Amazônia (UNAMA), em 2007, disponível em <http://www.unama.br/graduacao/fisioterapia/pdf/2007/Estudo_comparativo_da_frequencia_cardiaca_e_da.pdf>. Acesso em 15 de mai. de 2016.
- PILLING, Sérgio. Físico-Química Experimental. Prática 5, **Tensão superficial**, para Universidade do Vale do Paraíba em São José dos Campos – SP. Disponível em <http://www1.univap.br/spilling/FQE2/FQE2_Introducao,ementa.pdf>. Acesso em: 24 de mar. de 2016.
- ROGERS, Eric M. **Physics for the inquiring mind**: the methods, nature, and philosophy of physical science. Princeton, New Jersey: Princeton University, 1960.
- SEARS, Franis Weston e ZEMANSKY, Mark W. **FÍSICA**. (3 volumes). Vol. 1. (Tradução de Carlos Campos de Oliveira do original University Physics. 1ª Impressão de 1959). Rio de Janeiro: Livros Técnicos SA, 1970.
- SILVEIRA, Sérgio Lang & LEVIN, Yan. **Pressão e volume em balões de festa: podemos confiar em nossa intuição?** Revista Cad. Bras. Ens. Fis., v. 21, n. 3: p. 285-295, dez. 2004. Disponível em <<http://www.if.ufrgs.br/~levin/Pdfs.dir/Baloes.pdf>>. Acesso em 29 de jan. de 2016.
- Surface Tension (cap. 5. Rodapé do texto: Copyright1 © 998–2010 Benny Lautrup). Disponível em: <<http://www.cns.gatech.edu/~predrag/courses/PHYS-4421-13/Lautrup/surface.pdf>>. Acesso em 24 de mar. de 2016.
- THUREY, Nils; WOJTAN, Chris; GROSS, Marcus e TURK, Greg. **A Multiscale approach to mesh-based surface tension flows**. Artigo (s/d) disponível em <http://pub.ist.ac.at/group_wojtan/projects/surface_tension/surface_tension.pdf>. Acesso em 16 de abr. de 2016.
- UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO (USP). Departamento de Química (IQ-USP), **Adsorção de solução**. Disponível em <<http://www2.iq.usp.br/docente/hvlinner/adsorcao.pdf>>. Acesso em 18 de abr. de 2016.
- UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA (UDESC). Centro de Ciências Tecnológicas (CCT) do Departamento de Química (DQM), para o Laboratório de Físico- Química Experimental, sobre **Tensão superficial**. Disponível em <http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/carlad/materiais/07_08_TensaoSuperficial.pdf>. Acesso em 24 de mar. de 2016.
- UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS (UNICAMP).: **Ossos**. Disponível em <http://webensino.unicamp.br/disciplinas/EF920-289819/apoio/1/aulas12e19_03_07.pdf>. Acesso em 16 de abr. de 2016.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA (UFSM). Grupo Ensino de Física. **Tensão superficial**. Disponível <<http://coral.ufsm.br/gef/Fluidos/fluidos20.pdf>>. Acesso em 24 de mar. de 2016.

MARIO DE SOUZA - nascido em 05 de junho de 1952, na Mustardinha, bairro de Recife, em Pernambuco, filho de Enéas de Souza e Severina Renato de Souza; meu pai teve estudos parados na formação primária (Ensino Fundamental I), enquanto que minha mãe não teve educação formal, apenas participou do Movimento Brasileiro pela Alfabetização (MOBRAL) e, presença em algumas escolas de bairro (Córrego do Euclides e Areias, lugares onde residimos).

Começo o Primário, numa escola de bairro (Mustardinha), com a professora Militana Ramos Coutinho, tendo que participar de outras escolas de bairro, devido a mobilidade para o acesso a moradia, até que consigo entrar, por concurso público, na ETPAM - Escola Técnica Professor Agamenon Magalhães -, no bairro de Encruzilhada, em Recife; termino o ginásio (Ensino Fundamental II). Em seguida passo para o curso técnico de mecânica, no horário noturno, como segundo grau, mas fico até o segundo ano, desse nível, nessa escola que, por motivo de reprovação na oficina de mecânica, mudo para o segundo grau científico indo para uma escola da Rede Privada de Ensino.

Presto exame ao vestibular para o curso de Engenharia Civil, mas não sou classificado. No ano seguinte, em 1972/3, faço vestibular para a Área II, para o curso de Física. Sou aprovado na UFPE - Universidade Federal de Pernambuco -, no Departamento de Física (DF). É um processo doloroso para minha pessoa, em estudar, por razões financeiras, dentre outros, que me arrasto no curso de Física e, tive que lecionar Física e Matemática em escolas da Rede Privada de Ensino, de Areias e, isso me fez olhar para a Licenciatura em Física, embora sempre tivesse, um olhar para o Bacharelado em Física. E, após terminar a Licenciatura em Física, completo a carga horária para o mesmo.

Comecei o mestrado em Engenharia Elétrica, da UFPE, no Departamento de Engenharia Elétrica e Sistema, onde trabalhei com o professor doutor Ricardo Campello de Souza, sobre "Códigos Corretores de Erros em Brust", mas não terminei, pois, ao passar num concurso interno da Secretaria de Educação de Pernambuco, onde lecionava Física e Matemática, vou trabalhar como Técnico em Ensino de Física, na Sede da mesma, para comandar, junto a outros professores da Rede Estadual de Ensino, e Universidades Federais, de Pernambuco, os trabalhos do Ensino de Física, inclusive o de construir uma Proposta de Ensino para Física, na Rede Estadual de Ensino. Por esse motivo terminei 540 horas no referido Mestrado, tendo recebido, apenas, o certificado da carga horária do referido curso e, desse modo, ficou o mesmo considerado ao nível de especialização.

Fiz Pós-Graduação na UFPE, no Departamento de Energia Nuclear (DEN), onde fui aprovado por um concurso nessa unidade de ensino. Nesse DEN, comecei a trabalhar com o professor doutor João Antônio Filho, na pesquisa de construir barreiras de proteção radiológica com uso do mineral Scheelita, mas por problemas judiciais para com minha pessoa, no âmbito familiar, não pude concluir o mestrado, onde faltava poucas disciplinas e o experimento para a conclusão do mesmo. Foi um baque muito forte em mim. Esse curso foi um despertar que tive ao trabalhar a disciplina Física Aplicada à Biologia, na Universidade de Pernambuco (UPE), Campus Mata Norte (CMN) no Departamento de Biologia, onde ampliei conhecimentos sobre a relação entre Física e Biologia. Esse evento aconteceu também por indicação do colega e professor adjunto Gérson Henrique da Silva, da UPE-CMN, do DM - Departamento de Matemática.

Passei novamente num concurso para a Pós-Graduação, nível de Mestrado, na Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Unidade Acadêmica de

Garanhuns (UAG), no Programa do Mestrado Nacional Profissional de Ensino de Física (MNPEF), feito pela Sociedade Brasileira de Física (SBF), onde trabalhei a dissertação "A multidisciplinaridade sistêmica como metodologia de ensino: Tensão Superficial e Capilaridade no contexto da Biologia", com a orientação do professor doutor Alberto Einstein Pereira de Araújo, fato que levou ao projeto de escrever esse livro sobre o tema que envolve o produto de ensino, da dissertação, que tem desenvolvimento metodológico e um produto, com tema físico para o Ensino Médio, como normas de conclusão do curso pela SBF-MNPEF.

Enquanto atividade profissional, começo a lecionar em 1974 e não mais parei. Passei a trabalhar no Ensino Fundamental (Desenho e Matemática) e no Ensino Médio (Matemática e Física) em Escolas da Rede Privada e da Rede Estadual de Ensino. Também lecionei na UFRPE no antigo Departamento de Física e Matemática (DFM), enquanto coordenador administrativo da Especialização em Ensino de Física para professores da SEDUC-PE e no Departamento de Educação (DE), como professor substituto; lecionei na UFRN no Departamento de Física como Professor Tutor da Licenciatura em Física (EaD), polo de Nazaré da Mata (PE); lecionei na UPE-CMN no Departamento de Matemática, no de Pedagogia e no de Biologia, onde leciono hoje. Fui autor da Proposta de Ensino de Física em PE junto com a UFPE (DF) a UFRPE (DE) e a Universidade Católica de Pernambuco (UNICAP). Ministrei aulas de Matemática no PARFOR - Programa de Formação de Professores (polo Nazaré da Mata), no PROGRAPE - Programa de Graduação em Pedagogia, pela UPE-DE ministro Ciências Físicas e Biológicas para séries iniciais do Ensino Fundamental I, no PRONERA (Programa Nacional de Educação na Reforma Agrária), com Matemática. Trabalhei orientações de monografias na UFRPE-DFM (Ensino de Física), na UPE-CMN-DM (Ensino de Matemática); participei de programas de capacitação da SEDUC-PE como professor de Física. Construo textos enquanto material de apoio para professores de Física, como dinâmica de formação profissional.



Tensão, tensão superficial e capilaridade:

Conceitos e definições



www.atenaeditora.com.br



contato@atenaeditora.com.br



[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)



www.facebook.com/atenaeditora.com.br





Tensão, tensão superficial e capilaridade:

Conceitos e definições



www.atenaeditora.com.br



contato@atenaeditora.com.br



[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)



www.facebook.com/atenaeditora.com.br

