

ROSIMEIRE FERNANDES FERREIRA

MECÂNICA DE FLUIDOS E ALGUMAS APLICAÇÕES

JI-PARANÁ-RO

2010

ROSIMEIRE FERNANDES FERREIRA

MECÂNICA DE FLUIDOS E ALGUMAS APLICAÇÕES

Prof. Dr. WALTER TRENNEPOHL JUNIOR
Orientador

JI-PARANÁ-RO, JULHO DE 2010.



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE RONDÔNIA
DEPARTAMENTO DE FÍSICA DE JI-PARANÁ - DEFIJI
CAMPUS DE JI-PARANÁ

ROSIMEIRE FERNANDES FERREIRA

MECÂNICA DE FLUIDOS E ALGUMAS APLICAÇÕES

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Departamento de Física da Universidade Federal de Rondônia - Campus de Ji-Paraná, como parte dos requisitos para obtenção do título de graduação em Licenciatura Plena em Física.

JI-PARANÁ, JULHO DE 2010.

MECÂNICA DE FLUIDOS E ALGUMAS APLICAÇÕES

ROSIMEIRE FERNANDES FERREIRA

Este trabalho de conclusão de curso foi julgado adequado para a obtenção do título de graduação em Licenciatura Plena em Física, sendo aprovado em sua forma final em 19/07/2010, pelo Departamento de Física da Universidade Federal de Rondônia – Campus de Ji-Paraná.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Walter Trennepohl Junior
Orientador - UNIR

Prof. Ms. Francisco Cândido
Membro UNIR

Prof. Dr. Carlos Mergulhão Junior
Membro UNIR

DEDICATÓRIA

Ao Deus Eterno! Por me amar, me resgatar através de Seu filho e sempre estar comigo, pois “digno és, Senhor, de receber glória, e honra, e poder; porque tu criastes todas as coisas, e por tua vontade são e foram criadas.” Apocalipse 4:11. Te amo querido!

À minha família querida, principalmente aos meus pais Ezequiel e Léia, pelo amor, pelo carinho, pelo cuidado e estímulo que me ofereceram. Aos meus irmãos Emerson, Leondas, Pâmela, ao pequeno Ricardinho e às lindas Aline e Rayanne também, por estarem comigo sempre. Meus amores! Minha Base!

Ao meu primo Edson Fernandes da Silva. Não me esqueço da sua parte nisso querido!

À preciosa Igreja que me ensina desde muito antes de eu chegar aqui! Estou voltando à ativa amada!

Aos meus amigos, pelo apoio nos estudos, pelos bons risos juntos e acima de tudo por ficarem no meu coração me ensinando importâncias além da Física. Quero sempre abençoar vocês!

Aos meus professores na UNIR Campus de Ji-Paraná. Vocês são especiais para mim!

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Walter Trennepohl Junior pela orientação, compreensão e atenção no decorrer deste trabalho.

Agradeço ao Prof. Dr. Judes Gonçalves dos Santos pelo apoio sempre.

Agradeço ao meu amigo e irmão Ronaldo Soares Muller.

Aos meus amigos da Câmara Municipal de Ji-Paraná.

Agradeço ao CEULJI – Centro Universitário Luterano de Ji-Paraná pelos livros emprestados.

Agradeço ao Departamento de Física de Ji-Paraná pelo apoio institucional.

Agradeço aos professores desta graduação.

RESUMO

Este trabalho apresenta de forma teórica seu tema central que são os fluidos. Dentro deste tema, através de pesquisas bibliográficas, expomos, por exemplo, sobre densidade, compressibilidade e viscosidade, que são propriedades de fluidos e que são levadas em consideração principalmente quando se trata de um fluido real. Algumas considerações são feitas sobre as forças / tensões que podem atuar sobre um fluido, principalmente sobre a tensão de cisalhamento, que é a que pode causar escoamento de um fluido. Também serão apresentados neste trabalho alguns princípios dentro da Mecânica de Fluidos como os de Pascal, Arquimedes e Stevin. Pelo apreço à biofísica, em alguns momentos é feita referência sobre aspectos de fluidos vitais como a água e o sangue.

Palavras-Chave: Fluido, Pressão, Escoamento, Viscosidade, Tensão.

ABSTRACT

This paper presents by the theoretical way its central theme is that the fluids. Within this theme through literature searches, we show, for example, on density, viscosity and compressibility, properties that are fluid and are taken into consideration especially when it comes to a real fluid. Considerations are made about the strength / stress that can act on a fluid, especially on the shear stress, which is what can cause fluid flow. Will also be presented in this paper some principles in the Fluid Mechanics such as Pascal, Archimedes and Stevin. Due the appreciation to the biophysics at times reference is made about aspects of vital fluids such as water and blood.

KEY WORDS: Fluid, Pressure, Flow, Viscosity, Strains.

“Quanto ao Senhor, seus olhos passam por toda a terra, para mostrar-se forte para com aqueles cujo coração é totalmente dele”

II Crônicas 16:9

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	13
1- FLUIDOS	14
1.1 CARACTERÍSTICAS DOS FLUIDOS	14
1.1.1 Densidade	15
1.1.2 Compressibilidade	16
1.1.3 Viscosidade	16
1.1.3.1 Viscosidade da Água	18
1.2 TIPOS DE FLUIDOS	19
1.2.1 Fluidos Reais	19
1.2.2 Fluidos Ideais	20
2 MECÂNICA DOS FLUIDOS	21
2.1 HIDROSTÁTICA	21
2.1.1 Forças Volumétricas e Forças Superficiais	21
2.1.2 Segunda Lei de Newton	22
2.1.3 Isotropia de Pressão	22
2.1.4 Diferença de Pressão Entre Dois Pontos	24
2.1.5 Vasos Comunicantes	25
2.1.6 Teorema de Stevin	26
2.1.7 Pressão Atmosférica	27
2.1.8 Pressão Relativa	28
2.1.9 Unidades de Pressão	28
2.1.10 Princípio de Pascal	29
2.1.10.1 Prensa Hidráulica	30
2.1.11 Princípio de Arquimedes	31
2.1.11.1 Peso Aparente	32
2.1.12 Tensão Superficial	33
2.2 PRESSÕES NO CORPO HUMANO	34
2.2.1 Pressão Sanguínea.....	34

2.2.2 Medição da Pressão Arterial	36
2.2.3 Pressão Intra-Ocular	37
2.3 HIDRODINÂMICA	38
2.3.1 Tipos de Escoamento	38
2.3.2 Tensão Tangencial ou de Cisalhamento	39
2.3.3 Taxa de Cisalhamento	40
2.3.4 Definição de Viscosidade.....	41
2.3.5 Campo de Velocidade	42
2.3.6 Linhas de Corrente	42
2.3.7 Tubo de Corrente	43
2.3.8 Comportamentos Particulares das Linhas e Tubos de Corrente	43
3 EXPERIMENTO DE REYNOLDS	44
3.1 ESCOAMENTO LAMINAR	45
3.2 ESCOAMENTO DE TRANSIÇÃO	46
3.3 ESCOAMENTO TURBULENTO	46
4 MASSA ATRAVESSANDO UMA SECÇÃO TRANSVERSAL DE UM TUBO	47
4.1 EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE	47
4.2 EQUAÇÃO DE BERNOULLI	48
4.2.1 Tubo de Venturi	51
4.3 EQUAÇÃO DE POISEULLI	52
CONCLUSÕES	53
REFERÊNCIAS	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matéria nos estados líquido e gasoso (Fluidos) e no estado sólido	14
Figura 2 - Estrutura molecular da água (H_2O) ^[8]	18
Figura 3 - Perfil da velocidade de um fluido real escoando por um tubo ^[7]	19
Figura 4 - Tensão sob pressão hidrostática ^[11]	23
Figura 5 - Diferença de pressão entre dois pontos ^[11]	24
Figura 6 - Vasos comunicantes	25
Figura 7 - Pressões sobre um líquido em recipiente aberto	26
Figura 8 - Representação do gráfico da pressão absoluta X altura	26
Figura 9 - Experimento de Torricelli	28
Figura 10 - Prensa hidráulica (Adaptada de Halliday: 2002, p. 56) ^[12]	30
Figura 11 - Princípio de Arquimedes: Empuxo	31
Figura 12 - Representação de tensão superficial	33
Figura 13 - Pressão no corpo humano X altura ^[7]	36
Figura 14 - Representação de aferimento de pressão arterial ^[7]	36
Figura 15 - Tensão tangencial ou de cisalhamento	39
Figura 16 - (a) Camadas de fluido em repouso (b) camadas de fluidos sob ação de tensão cisalhante ^[15]	40
Figura 17 - Variação da taxa cisalhamento ^[15]	41
Figura 18 - Linhas de corrente	42
Figura 19 - Representação de um tubo de corrente	43
Figura 20 - Ilustração do aparato experimental de Reynolds ^[17]	44
Figura 21 - Velocidade num escoamento laminar	45
Figura 22 - Representação de um tubo de escoamento (equação da continuidade)	47
Figura 23 - Representação de um tubo de escoamento (equação da Bernoulli)	48
Figura 24 - Tubo de Venturi	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de viscosidade ^[7]	17
Tabela 2 - Unidades utilizadas para pressão	29
Tabela 3 - Valores de tensão superficial ^[13]	34
Tabela 4 - Valores típicos de pressão ^[14]	38
Tabela 5 - Valores do Número de Reynolds / Tipos de escoamento	45

INTRODUÇÃO

O cotidiano de todo ser vivo é cercado por situações que estão intimamente relacionadas com fluidos, como um simples respirar, a vital circulação sanguínea, o preparo de alimentos e, de maneira mais “técnica” e exigente, em muitas indústrias que lidam com fluidos.

Geralmente pela ocupação com o fim que se almeja através da ocorrência de um fenômeno que envolve fluidos, não existe uma busca em conhecer os ‘fluidos’, suas características e conseqüentes classificações. Fluidos é a matéria em seu estado líquido ou gasoso e, ao sofrer a ação de uma força, por menor que seja, sofrerá como conseqüência uma deformação que pode se dar através de escoamento. Basicamente, fluido é toda matéria que pode fluir, que inclui os líquido e os gases.

Neste trabalho, daremos ênfase aos líquidos, sem nos aprofundarmos nos fenômenos em si e nas equações que os regem. Além disto, de maneira sutil, destacaremos algumas relações com fenômenos envolvendo o corpo humano, através da abordagem de algumas características de fluidos.

Em se falar de fluidos, destacam-se os ramos da ciência que se dedicam ao seu estudo, como a Mecânica de Fluidos, que aborda as características dos fluidos, como a pressão exercida sobre estes e por estes e os classificamos considerando o estado em que os mesmos se encontram, em repouso ou em movimento.

1 FLUIDOS

Flúidos são todas as substâncias que se encontram nos estados líquido ou gasoso. Os fluidos mais conhecidos, por serem essenciais à vida humana, são o ar, a água e o sangue.

Diferentemente dos sólidos que tem forma e volume definidos, os flúidos, quando colocados em um recipiente, tendem a se adaptar à forma do recipiente, mas com algumas diferenças. Como os líquidos têm volume definido, eles assumem a forma do recipiente que os contém enquanto que os gases, por não terem volume definido, ocupam todo o volume do recipiente que o contém, não importando se o recipiente for pequeno como um copo ou se for grande, como o espaço sobre a superfície terrestre.

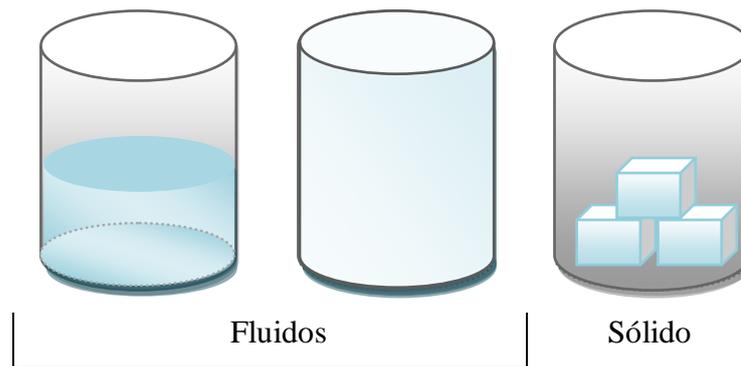


Figura 1 – Matéria nos estados líquido e gasoso (fluidos) e no estado sólido.

Dependendo das condições externas às quais um sólido, tal como o piche, é submetido, este também poderá se tornar um fluido, ou seja, um objeto que hoje chamamos de “sólido” futuramente poderá ser um fluido e vice-versa.

1.1 CARACTERÍSTICAS DOS FLUIDOS

A principal característica dos fluidos é que estes escoam facilmente quando submetidos à ação de uma força tangencial em qualquer uma de suas superfícies, qualquer que seja a intensidade desta força.

Para se caracterizar os fluidos precisa-se determinar algumas de suas propriedades, tais como densidade, compressibilidade e viscosidade.

1.1.1 DENSIDADE

Uma característica importante dos fluidos, bem como de toda matéria, é sua densidade ou ‘massa específica’, que representa a quantidade de matéria existente por unidade de volume. Sendo ΔV um pequeno volume em torno de um ponto P de um corpo, mas grande o suficiente para conter um grande número de átomos ou moléculas do corpo, e Δm a massa desta porção de volume, defini-se a densidade ρ deste ponto P do fluido pela relação: ^[1]

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta m}{\Delta V} \right) = \frac{dm}{dV} \quad (1)$$

Defini-se também a densidade média de um corpo de volume total V cuja massa total é m pela relação:

$$\bar{\rho} = \frac{m}{V}$$

Evidentemente, quando todos os pontos de um corpo tem a mesma densidade ρ , então teremos $\bar{\rho} = \rho$.

As unidades de densidade no SI são kg/m³.

A água pura, a uma temperatura de 3,98 °C, possui uma densidade de 1,0 g/cm³. ^[2] Heneine (2006) relata que no corpo humano a densidade de tecidos e fluidos biológicos é praticamente constante, variando apenas em estreitos limites e com valores próximos ao da água, com exceção do tecido ósseo, que é muito mais denso. O sangue humano tem densidade $\rho = 1,057 \text{ g/cm}^3$ e variações de sua densidade, além de pequenos limites, podem refletir em patologias. ^[3]

Em geral, quando a temperatura de um corpo aumenta ele se dilata e quando a temperatura de um corpo diminui ele se contrai. Como a massa dos corpos não varia com a temperatura, segue que a densidade dos corpos depende de suas temperaturas.

1.1.2 COMPRESSIBILIDADE

Todos os corpos sofrem variações de volume quando submetidos a forças de tração ou de compressão, isto é, possuem uma certa compressibilidade. Quanto aos fluidos, em geral, os líquidos têm pouca compressibilidade pois, mesmo quando submetido a pressões consideráveis, sua densidade varia muito pouco enquanto que os gases são muito compressíveis. Segundo Gonçalves (1979), um litro de água, inicialmente à pressão de 1 atm, submetido a uma pressão de 25 atm terá seu volume reduzido a 0,93 litros enquanto que a mesma variação de pressão aplicada sobre um litro de um gás reduzirá seu volume para 0,04 litros ^[4].

Por definição, o coeficiente de compressibilidade de um fluido com pressão e volume iniciais V_0 e p_0 , é, em valor absoluto, a razão entre a fração da variação do volume ΔV do fluido e a respectiva variação Δp de sua pressão, no limite onde $\Delta p \rightarrow 0$, ^[5] isto é:

$$\frac{1}{C} = - \frac{1}{V_0} \cdot \frac{dV}{dp} \quad (2)$$

1.1.3 VISCOSIDADE

Os fluidos apresentam uma resistência à deformação ou ao escoamento, quando submetidos a uma determinada tensão, chamada de viscosidade. A viscosidade se deve às forças de atrito no interior dos fluidos que impedem diferentes porções dos fluidos de escorregarem entre si livremente. Assim, a viscosidade é uma medida da resistência do fluido de se movimentar, sendo que quanto maior for a viscosidade de um fluido, maior será sua dificuldade para escoar. Para os gases, a viscosidade está relacionada com a transferência de impulso devido à agitação molecular. Já a viscosidade dos líquidos relaciona-se mais com as forças de coesão entre as moléculas.

Segundo Heneine (2006) ^[3], a viscosidade dinâmica de um fluido é sua resistência interna, sendo visível nos escoamentos quando se compara o escoamento da água (viscosidade menor) com o do mel ou xaropes (viscosidade maior). Como se observa, a viscosidade de um fluido tem influência direta na sua velocidade de escoamento. Também devido à viscosidade, quando um fluido escoar num tubo, sua velocidade é nula próxima às paredes e aumenta na direção do centro do tubo.

Em geral, a viscosidade de um fluido diminui quando sua temperatura aumenta. Assim, por exemplo, a viscosidade dos óleos de motores diminui à medida que a temperatura do motor aumenta e a viscosidade do sangue aumenta quando a temperatura do corpo diminui, fato que ocorre quando uma pessoa se encontra em estado de choque. Neste caso, recomenda-se aquecer esta pessoa. A influência da temperatura na viscosidade dos líquidos deve-se ao fato de que quanto maior a temperatura do líquido maior é a distância entre suas moléculas, menor é então a interação entre elas e, assim, maior é a facilidade com que as moléculas podem se movimentar no interior do fluido, portanto menor é a viscosidade.

A viscosidade de um fluido é medida através de seu coeficiente de viscosidade, que será definido posteriormente. Na tabela abaixo temos alguns valores de viscosidade:

Fluido	Temperatura °C	Viscosidade (Pa.s)
Glicerina	20	1,49
Sangue	37	$4 \cdot 10^{-3}$
Mercúrio	20	$1,55 \cdot 10^{-3}$
Água	0	$1,79 \cdot 10^{-3}$
	20	$1,00 \cdot 10^{-3}$
	37	$6,91 \cdot 10^{-4}$
	100	$2,82 \cdot 10^{-5}$
Ar	0	$1,71 \cdot 10^{-5}$
	18	$1,83 \cdot 10^{-5}$
	40	$1,90 \cdot 10^{-5}$

Tabela 1 – Valores de viscosidade ^[7]

Dentre os fluidos que existem no corpo humano, o principal é o sangue e sua viscosidade exerce papel fundamental nas nossas vidas, já que variações na sua viscosidade podem trazer danos à saúde. Conforme Heneine (2006): ^[3]

Aumento da viscosidade Diminui a velocidade do fluxo e pode caracterizar policemia vera, caracterizada pelo aumento dos glóbulos vermelhos ou ainda certas macroglobulinemias, que é o aumento de globulinas, as quais representam a maior parte das proteínas do sangue, sendo necessário, neste caso, uma intervenção rápida para se restabelecer o valor normal da viscosidade do sangue.

Diminuição da viscosidade Caracteriza anemias profundas e, se houver variação na velocidade do fluxo do sangue, pode ocorrer o aparecimento de um sopro circulatório audível em várias partes do tórax.

1.1.3.1 VISCOSIDADE DA ÁGUA

A princípio, Heneine (2006)^[3] salienta que a água, devido à sua estrutura que consiste de dois átomos de hidrogênio e um de oxigênio, deveria ter alta viscosidade por causa das pontes de hidrogênio. Isto seria um fator desfavorável para os seres vivos, pois uma alta viscosidade seria prejudicial a todas as trocas hídricas dos organismos e, no caso da circulação sanguínea, um obstáculo à hemodinâmica. Felizmente, a viscosidade da água é muito baixa (0,001 Pa.s a 20°C) e, acredita-se, que isso se deve à contínua flutuação das pontes de hidrogênio, que se fazem e desfazem em 10^{-11} s.^[3]

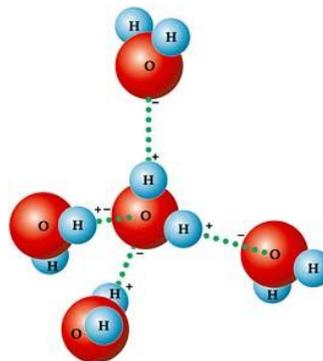


Figura 2 – Estrutura molecular da água (H₂O)^[8]

Além disto, devido a sua estrutura, que tem fórmula química H₂O, a água deveria ser gasosa a temperatura ambiente, tal como o é o sulfureto de hidrogênio que tem fórmula química H₂S. Porém a água possui um tipo de interação diferenciado. Os hidrogênios ligados

ao oxigênio formam o lado "positivo" do dipolo permanente desta molécula, pois o elétron do hidrogênio é fortemente atraído pelo oxigênio, resultando em uma forte rede de ligações intermoleculares. No H_2S a extremidade negativa do dipolo de uma molécula se aproxima da extremidade positiva do dipolo de outra molécula, com interações menos forte do que a que ocorre no H_2O .^{[9][10]}

1.2 TIPOS DE FLUIDOS

Embora todos os fluidos possuam viscosidade e compressibilidade, estas propriedades em alguns fluidos são pequenas ou podem ser desconsideradas em certas situações, fato que facilita muito o entendimento de seu movimento e a obtenção de equações. Por isto, costuma-se dividir os fluidos em reais e ideais.

1.2.1 FLUIDOS REAIS

Os fluidos reais apresentam compressibilidade e viscosidade, ou seja, resistência à deformação ou ao escoamento quando sofrem ação de uma determinada tensão. Logo, para haver escoamento de um fluido real num tubo horizontal, é necessário a aplicação de forças externas, pois existem forças dissipativas durante o escoamento que converte energia cinética em calor.

Como consequência da viscosidade, por exemplo, a velocidade com que as partículas do fluido se deslocam ao longo de um tubo horizontal é nula próxima às paredes do tubo e máxima no centro do tubo, formando um fluxo parabólico.^[7]

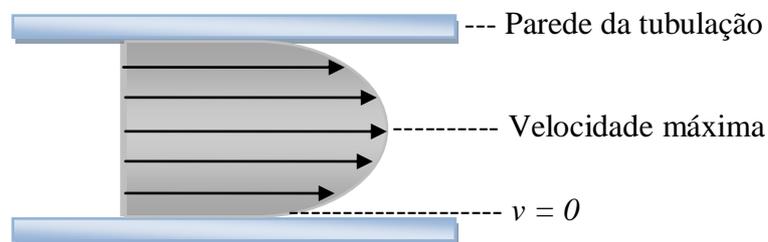


Figura 3 – Perfil da velocidade de um fluido real escoando por um tubo (adaptada)

1.2.2 FLUIDOS IDEAIS

Defini-se um fluido ideal como um fluido incompressível e que não possui viscosidade. A hipótese de incompressibilidade é válida, com boa aproximação, quando se trata de líquidos, porém, para os gases, ela só é válida quando o escoamento é tal que as diferenças de pressão não são muito grandes. ^[11]

Em relação a um fluido viscoso, por exemplo, o escoamento de um fluido ideal através de um tubo horizontal não será parabólico, pois as partículas do fluido contidas numa mesma superfície transversal do tubo se deslocarão agora com a mesma velocidade.

2 MECÂNICA DOS FLUIDOS

A Mecânica dos Fluidos tem como finalidade o estudo do comportamento dos fluidos e das leis que regem este comportamento, seja de fluidos em repouso (hidrostática) ou de fluidos em movimento (hidrodinâmica). Sua área de aplicação engloba setores como: construção civil (hidrelétricas), construção naval (embarcações), indústria aeronáutica (aerodinâmica), medicina, etc..

2.1 HIDROSTÁTICA

A Hidrostática estuda o comportamento de fluidos em repouso. Pode-se dizer que um fluido está em repouso quando qualquer porção do fluido estiver em repouso em relação ao recipiente que o contém, ou seja, quando o fluido não está escoando. Como para um fluido estar em repouso não pode haver tensões tangenciais atuando sobre ele, segue que num fluido em repouso a resultante das forças que atuam sobre qualquer porção do fluido é nula e a porção de fluido somente exerce forças normais sobre as demais porções ou paredes do recipiente que o contém.

2.1.1 FORÇAS VOLUMÉTRICAS E FORÇAS SUPERFICIAIS

Ao analisar os fluidos através de sua estrutura molecular, observa-se uma matéria descontínua, constituída por moléculas separadas por espaços vazios. O estudo de um fluido a partir deste enfoque molecular é de difícil solução matemática, pois, por exemplo, a derivada de uma função só pode ser calculada em um ponto se a função for contínua neste ponto. Por esta razão é conveniente se tratar o fluido como um meio *contínuo*, onde não existem espaços vazios.

Numa porção de um fluido contínuo podem atuar as seguintes forças:

- **Forças superficiais:** são forças interatômicas de curto alcance entre uma dada porção do meio, limitada por uma superfície S , e as porções adjacentes, sendo transmitidas através da superfície S . São, assim, forças de contato.

Como a força superficial sobre a área que envolve uma porção de fluido deve ser proporcional a esta área e perpendicular a ela, defini-se a pressão p sobre um elemento de superfície pela razão entre a força F atuando perpendicularmente nesta superfície e área S desta superfície, no limite quando a área tende a zero, isto é:

$$p = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta F}{\Delta S} \right| = \left| \frac{dF}{dS} \right| \quad (3)$$

- **Forças volumétricas:** são forças de longo alcance que atuam em todos os pontos de um meio. Em geral estas forças são provenientes das ações de campos gravitacional, elétrico e magnético, de tal forma que a força resultante sobre um elemento de volume é proporcional ao volume. Assim, no caso da força gravitacional, a força sobre um elemento de volume ΔV em torno de um ponto do meio cuja densidade é ρ , é dada por:

$$\Delta F_g = \Delta mg = \rho g \Delta V \quad (4)$$

onde g é a aceleração da gravidade, ρ é a densidade do fluido e m a massa do elemento de volume ΔV .^[1]

2.1.2 SEGUNDA LEI DE NEWTON

A segunda Lei de Newton fornece a equação de movimento para uma porção de fluido ideal em movimento^[1]. A equação que descreve o movimento de uma porção de massa Δm do fluido com aceleração a e sujeita a ação de uma força volumétrica ΔF_v e de uma força superficial ΔF_s será dada por:

$$\Delta ma = \rho a \Delta V = \Delta F_v + \Delta F_s \quad (5)$$

2.1.3 ISOTROPIA DA PRESSÃO

Seja uma pequena porção de fluido de massa desprezível em forma da cunha mostrada na figura 4. Estando o fluido em repouso e desprezando-se o peso desta porção, tem-se que as únicas forças atuando na porção em destaque na figura são as forças superficiais exercidas pelo resto do fluido, que são normais às áreas em destaque.^[11]

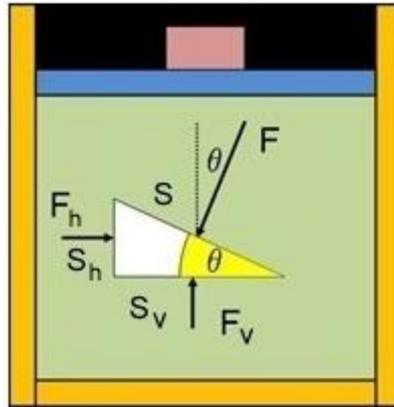


Figura 4 – Tensão sob pressão hidrostática ^[11]

Pela geometria da cunha, pode-se observar que:

$$S_h = S \sin \theta \quad S_v = S \cos \theta$$

e, considerando-se que esta cunha está em repouso, deve-se ter que

$$F_h = F \sin \theta \quad F_v = F \cos \theta$$

Dividindo-se agora as equações acima membro a membro obtém-se

$$\frac{F}{S} = \frac{F_h}{S_h} = \frac{F_v}{S_v} \quad (6)$$

Como a relação acima independe do volume da cunha, vale a mesma relação quando o volume da cunha tender a zero. Assim, pode-se observar que sobre qualquer ponto de um fluido em repouso atua uma mesma pressão vinda de todas as direções e, pela segunda Lei de Newton, que cada ponto no interior de um fluido exerce uma pressão igual em todas as direções.

2.1.4 DIFERENÇA DE PRESSÃO ENTRE DOIS PONTOS

Um dos resultados mais interessante da mecânica dos fluídos é o de que a diferença de pressão entre dois pontos no interior de um fluido depende apenas da distância vertical que separa estes pontos. Para mostrar esta relação, vamos considerar uma pequena porção de fluido na forma de um retângulo de altura Δh e base S .

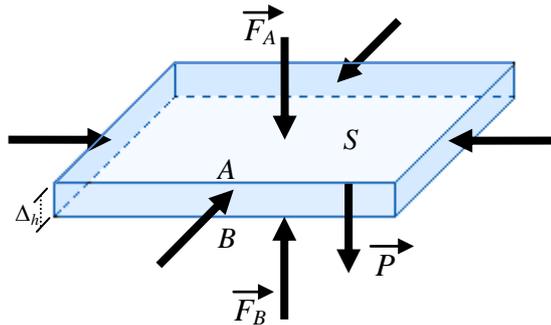


Figura 5 – Diferença de pressão entre dois pontos ^[11]

Considerando que as forças que atuam nas laterais se anulam, tem-se que:

$$\vec{F}_B + \vec{F}_A + \vec{F}_g = 0 \quad (7)$$

Escrevendo-se a relação acima na forma escalar, tem-se que

$$F_B - F_A = F_g$$

Como

$$F_B = p_B S \text{ e } F_A = p_A S$$

onde p_B e p_A são as pressões exercidas nas superfícies de nível B e A do disco de fluido e considerando que:

$$F_g = \Delta m g = \rho g \Delta V = \rho g S \Delta h$$

tem-se, com a relação entre as intensidades das forças envolvidas, que

$$p_B S - p_A S = \rho g S \Delta h$$

e, assim:

$$p_B - p_A = \rho g \Delta h \quad (8)$$

Da relação acima pode-se observar que dois pontos de um fluido à mesma altura estão à mesma pressão e que, por outro lado, dois pontos de um fluido à mesma pressão (chamado de pontos isóbaros) estão à mesma altura. Isto nos permite concluir, em particular, que a superfície livre de um líquido é plana e horizontal, já que a atmosfera exerce sobre todos os pontos da superfície de um líquido a mesma pressão.

2.1.5 VASOS COMUNICANTES

Um sistema de vasos comunicantes é um conjunto de vasos abertos à atmosfera, que são postos em comunicação entre si de maneira que ao colocarmos um líquido em um dos vasos do conjunto, o líquido se distribuirá por todos os demais vasos do conjunto. Como todos os pontos do líquido colocado nos vasos comunicantes em contato com a atmosfera estarão a mesma pressão, segue que eles deverão estar à mesma altura, ou seja, o líquido subirá em todos os ramos à mesma altura h , sendo então $h_A = h_B = h_C$, como mostra a figura 6.

Através de vasos comunicantes é possível perceber que a pressão depende apenas da profundidade e não de outras características, como a forma do vaso.

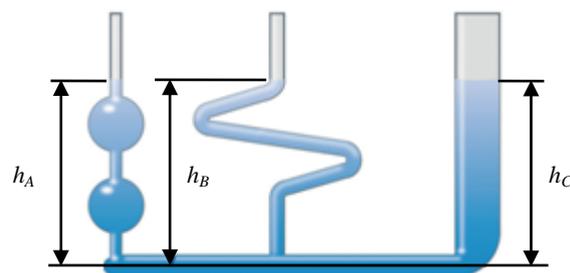


Figura 6 – Vasos comunicantes

2.1.6 TEOREMA DE STEVIN

Foi Stevin (1548 – 1620) que demonstrou o chamado Teorema de Stevin ou Teorema Fundamental da Hidrostática, que diz que a pressão no interior de um fluido incompressível aumenta linearmente com a profundidade. Sua demonstração pode ser feita como segue:

Sendo A um ponto da superfície livre de um líquido, isto é, em contato com a atmosfera, então sua pressão será a pressão atmosférica normal, ou seja, $p_A = p_0$. Neste caso, a pressão p_B num ponto B, situado a uma profundidade h contada a partir da superfície livre, será dada por:

$$p = p_0 + \rho gh \quad (9)$$

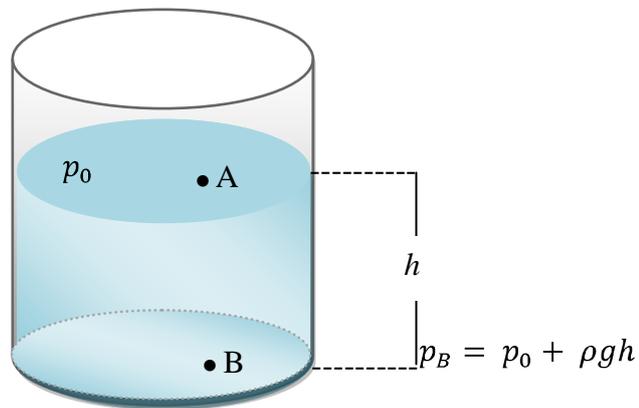


Figura 7 – Pressões sobre um líquido em recipiente aberto.

Com esta equação pode-se ver que a pressão num ponto no interior de um fluido aumenta linearmente com a distância do ponto à superfície e, assim, o gráfico da pressão de um ponto no interior do fluido com a distância h da superfície do líquido é uma reta como ilustrada na figura 8.

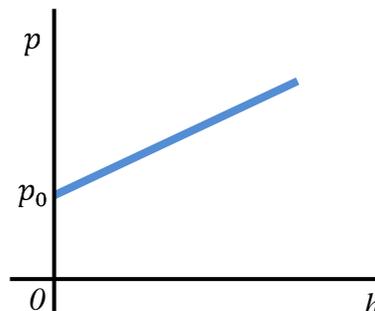


Figura 8 – Representação do gráfico da pressão absoluta X altura

2.1.7 PRESSÃO ATMOSFÉRICA

Como existe uma atmosfera sobre a superfície da Terra e como esta atmosfera é um fluido, segue que cada ponto no interior da atmosfera terrestre está sob ação de uma pressão, chamada de pressão atmosférica, que diminui a medida que a altura em relação a superfície terrestre aumenta.

Como o ar não pode ser considerado um fluido incompressível em extensões muito elevadas, a relação de Stevin não se aplica diretamente no caso da atmosfera, embora seja sempre possível se determinar facilmente a pressão atmosférica em qualquer ponto.

Em 1643 Evangelista Torricelli (1608 – 1647) idealizou um experimento prático para a determinação da pressão atmosférica, que foi realizado por Vincenzo Viviani ^[11]. Ele usou um tubo de 1 metro de comprimento, completamente cheio de mercúrio (Hg) e com uma extremidade tampada, como mostra figura 9 (a). Depois colocou o tubo em pé tapando a outra extremidade e colocando esta extremidade dentro de um recipiente contendo também mercúrio, como mostra a figura 9 (b). Finalmente, após destampar o tubo, mediu a altura da coluna de mercúrio existente no tubo que, por contrução, continha vácuo na parte superior, como mostra a figura 9 (c).

Como um ponto A na superfície livre do mercúrio está à mesma pressão que um ponto B na mesma altura no interior do tubo e como a pressão no ponto B é dada por $p_B = \rho gh$, pode-se determinar facilmente a pressão atmosférica, pois a densidade do mercúrio é conhecida e dada por $13,6 \text{ g/cm}^3$.

Repetindo-se o experimento de Torricelli num local onde a gravidade tem seu valor normal, obtém-se que a coluna de mercúrio sobe por uma altura de $h = 0,76\text{m}$. Sendo, por definição, a pressão num local onde a gravidade tem valor normal à pressão de 1 atm (uma atmosfera), pode-se obter que:

$$1 \text{ atm} = 101,3 \text{ kPa} = 76 \text{ cmHg} = 760 \text{ mmHg}$$

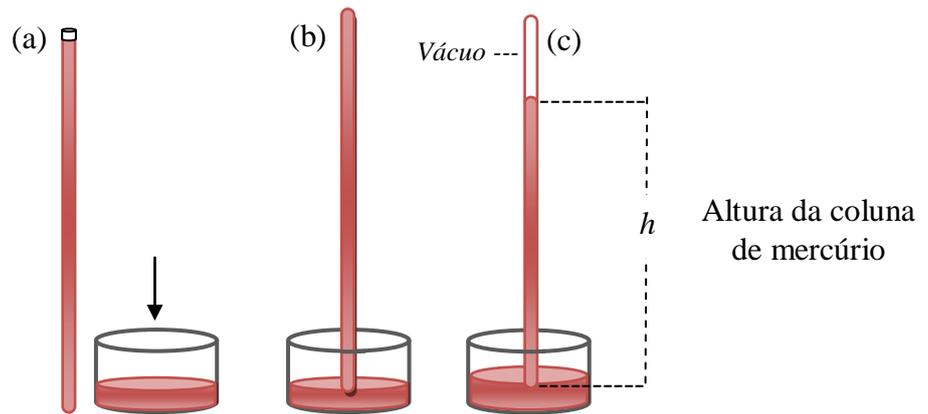


Figura 9 – Experimento de Torricelli

2.1.8 PRESSÃO RELATIVA

A pressão relativa tem a pressão atmosférica como referência, ou seja, é a diferença entre a pressão atmosférica e a pressão em um determinado ponto. Esta diferença de pressão é também chamada de pressão hidrostática, pressão efetiva ou pressão manométrica.

Assim, por exemplo, quando a pressão relativa num determinado ponto de um fluido for negativa, significa que a pressão naquele ponto é menor que a pressão atmosférica.

2.1.9 UNIDADES DE PRESSÃO

No SI a unidade para pressão é o pascal, sendo que $1 Pa = 1 N/m^2$. Entretanto, no cotidiano, costuma-se utilizar outras unidades de pressão, como a pressão que o peso de uma certa coluna de um líquido exerce sobre a base do recipiente que contém este líquido. As unidades mais comuns são:

- kgf/cm^2 (quilograma-força por centímetro quadrado)
- $cm H_2O$ – centímetros de uma coluna de água
- $mm Hg$ – milímetros de uma coluna de mercúrio

Na tabela 2 pode-se ver a relação entre algumas unidades de medida de pressão.

	Atmosfera	Pascal	Bária	Bar	mm Hg	m H ₂ O	kgf/cm ²
Atmosfera	1	1,013×10 ⁵	1,013×10 ⁶	1,013	760,00	10,33	1,03
Pascal	9,86×10 ⁻⁶	1	10	10 ⁻⁵	7,50×10 ⁻³	1,02×10 ⁻⁴	1,019×10 ⁻⁵
Bária	9,86×10 ⁻⁷	0,1	1	10 ⁻⁶	7,50×10 ⁻⁴	1,02×10 ⁻⁵	1,02×10 ⁻²
Bar	0,98	1×10 ⁵	1×10 ⁶	1	750,1	10,20	1,02
mm Hg	1,31×10 ⁻³	1,33×10 ²	1,33×10 ³	1,33×10 ⁻³	1	1,36×10 ⁻²	13,60
m H ₂ O	9,67×10 ⁻²	9,80×10 ³	9,80×10 ⁴	9,80×10 ⁻²	73,56	1	0,10
kgf/cm ²	0,96	9,81×10 ⁴	9,81×10 ⁵	0,98	735,8	10,00	1

Tabela 2 – Unidades utilizadas para pressão

2.1.10 PRINCÍPIO DE PASCAL

O Princípio de Blaise Pascal (1623-1662) diz que um acréscimo de pressão produzido num ponto de um fluido confinado em um recipiente transmite-se integralmente a todos os pontos do fluido ^[11]. Assim, por exemplo, se tivermos um fluido contido num recipiente e um pistão exercer uma pressão p_{ext} sobre toda a superfície livre do fluido, então todos os pontos do fluido sofrerão o mesmo aumento de pressão p_{ext} , qualquer que seja sua profundidade. Este princípio é a base dos dispositivos ampliadores de força, como macaco hidráulico, prensa hidráulica, direção hidráulica, etc.

Pode-se demonstrar o Princípio de Pascal considerando-se dois pontos quaisquer A e B, separados por uma distância vertical h , no interior de um fluido incompressível de densidade ρ , em repouso. Como vimos anteriormente, a diferença de pressão entre estes pontos é dada por:

$$p_B - p_A = \rho gh \quad (10)$$

Se houver aumento de pressão num ponto do fluido, então os pontos A e B sofrerão aumento de pressão dados por Δp_A e Δp_B . Como a diferença de pressão entre os pontos A e B deverá ser ainda ρgh , podemos escrever que:

$$(p_B + \Delta p_B) - (p_A + \Delta p_A) = \rho gh$$

Considerando-se na relação acima que

$$\rho gh = p_B - p_A$$

obtem que:

$$\Delta p_B = \Delta p_A \quad (11)$$

2.1.10.1 PRENSA HIDRÁULICA

A prensa hidráulica tem a função de multiplicar forças através de um tubo de área menor S_1 (entrada), conforme mostra a figura 10, ligado a outro tubo com área maior S_2 (saída), ambos contendo um fluido e com pistões sobre as superfícies do fluido. Pelo teorema de Pascal se, por exemplo, o pistão do tubo esquerdo, com menor área, produzir um aumento na pressão do fluido, o mesmo aumento de pressão será transferido ao restante do fluido, atingindo assim o pistão do tubo direito, com área maior. ^[12]

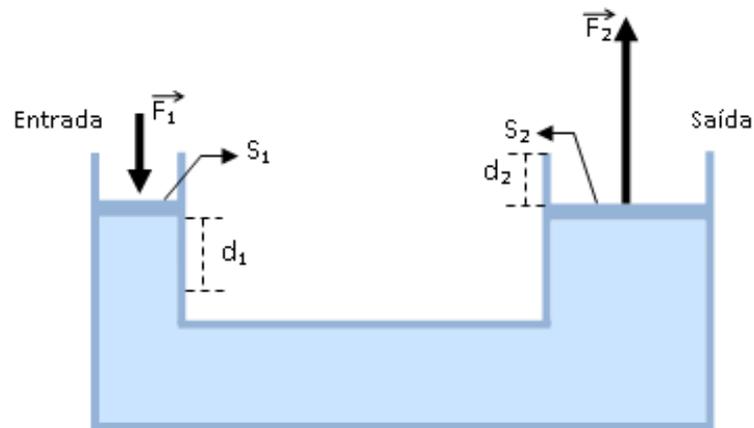


Figura 10 – Prensa hidráulica ^[12]

A partir da figura 10, tem-se a seguinte equivalência para variação de pressão Δp :

$$\Delta p = \frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2} \quad F_2 = F_1 \frac{S_2}{S_1} \quad (12)$$

Então, verifica-se que a força de saída F_2 sobre o pistão em S_2 é maior do que a força de entrada F_1 , se $S_2 > S_1$. Por outro lado, se o pistão de entrada descer uma distância d_1 , o

pistão de saída sobe uma distância d_2 , de forma que o mesmo volume V do líquido incompressível é deslocado nos dois ramos do tubo. Assim, tem-se que

$$V = S_1 d_1 = S_2 d_2 \qquad d_2 = d_1 \frac{S_1}{S_2} \qquad (13)$$

Como se observa, se $S_2 > S_1$ temos que $d_2 < d_1$, o que mostra que o que se ganha em força se perde em deslocamento.

2.1.11 PRINCÍPIO DE ARQUIMEDES

A hidrostática foi uma das áreas para as quais Arquimedes (282-212 a.C) deu uma importante contribuição. O Princípio de Arquimedes pode ser basicamente enunciado como: todo corpo mergulhado total ou parcialmente em um fluido sofre a ação de uma força vertical, dirigida de baixo para cima, igual ao peso do volume do fluido deslocado pelo corpo, aplicada no centro de empuxo do corpo, que é o centro de gravidade da porção de fluido deslocado pelo corpo. A esta força vertical dá-se o nome de empuxo.

Para demonstrar este princípio vamos considerar um corpo inteiramente submerso num fluido. Sabemos que este corpo sofrerá em toda sua superfície a pressão exercida pelo fluido, que aumenta com a profundidade.

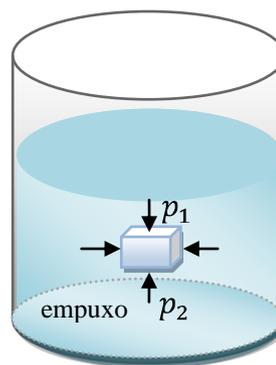


Figura 11 – Princípio de Arquimedes: Empuxo

Existem forças de pressão que atuam horizontalmente sobre o corpo e forças de pressão que atuam na vertical. Considerando que a variação de pressão no fluido depende

apenas da altura “ h ”, tem-se que as forças que agem na horizontal se anulam mutuamente, porém o mesmo não ocorre com as forças verticais.

Possuindo o corpo uma base de área S , altura h e volume V , e sendo ρ_f a densidade do fluido, temos pelo teorema de Stevin que:

$$p_2 - p_1 = \rho_f g h \quad (14)$$

Assim, a resultante das forças de pressão atuando no corpo é, por definição, o empuxo E , cujo módulo será dado por:

$$E = p_2 S - p_1 S = (\rho_f g h) S = \rho_f g V = m_f g \quad (15)$$

onde $m_f g$ é a massa de fluido deslocado pelo corpo.

2.1.11.1 PESO APARENTE

O peso que um corpo aparenta ter quando imerso em um fluido é chamado de *peso aparente*. O que torna mais fácil levantar alguém na água não é a diminuição de seu peso mas sim a força de empuxo, que sempre se opõe à força peso. Assim, o peso aparente de um corpo que se encontra no interior de um fluido é definido pela relação:

$$P_{ap} = P - E \quad (16)$$

Como o peso de um corpo é $P = \rho g h$ e o empuxo que este corpo sofre quando se encontra no interior de um fluido é $E = \rho_f g V$ e como estas são as únicas forças que atuam num corpo que se encontra no interior de um fluido, segue que se um corpo tem peso aparente positivo ele afunda, se tem peso aparente nulo ele flutua e se tem peso aparente negativo ele irá boiar sobre a superfície do líquido.

2.1.12 TENSÃO SUPERFICIAL

É uma propriedade de líquidos que faz com que sua superfície tenha um comportamento “elástico”.

Um líquido que escoa lentamente de um conta-gotas não emerge continuamente, mas o faz em pingos sucessivos. Colocando-se cuidadosamente uma agulha de costura sobre a superfície da água, ela produz uma pequena depressão, mas não afunda, mesmo que sua densidade seja dez vezes maior que a da água. Quando uma pipeta é colocada na água, esta sobe pelo tubo, mas se for no mercúrio, esta desce. Tais fenômenos, e muitos outros semelhantes, associam-se à existência de uma superfície limítrofe entre um líquido e alguma outra substância. (SEARS: 2000, p. 300)

Estes fatos mostram que as superfícies dos líquidos se encontram sob ação de uma força que é expressa como **tensão superficial**. É a intensidade desta interação que permite, por exemplo, que insetos permaneçam na superfície da água. A tensão superficial é uma propriedade dos líquidos que causa uma espécie de contração na sua superfície, formando uma fina pele elástica. Ela se deve as atrações intermoleculares que tendem a manter coesas as moléculas de um líquido. Essas atrações ou forças coesivas entre as moléculas no interior de um líquido são compartilhadas com os átomos vizinhos. As moléculas da superfície do líquido, entretanto, sofrem apenas atração lateral e inferior. Esta força para o lado e para baixo cria uma tensão na superfície que faz a mesma comportar-se como uma película elástica. Segundo Dalton (1979, p. 471), “as moléculas que se encontram compreendidas entre a superfície livre do líquido e à profundidade de 10^{-6} cm estão submetidas a forças orientadas para o interior do líquido”.

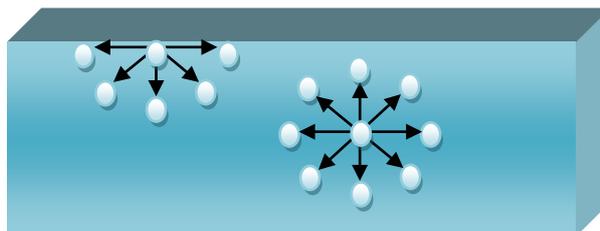


Figura 12 – Representação de tensão superficial

Seja um segmento de reta de comprimento L , da superfície livre de um líquido, e F a força de tensão que a superfície exerce num dos lados do segmento, normal a ele e tangente à superfície. Neste caso, por definição, a tensão superficial do líquido será dada por:

$$\delta = \frac{F}{L} \quad (17)$$

A tabela 3 apresenta valores da tensão superficial de fluídos mais comuns.

Líquido (20°C)	δ (10^{-3} N/m)
Azeite de oliva	33,06
Acetona	237
Água	72,8
Álcool etílico	22,8
Benzeno	29,0
Etanol	22,3
Glicerina	59,4
Mercúrio	465
Petróleo	26,0

Tabela 3 – Valores de tensão superficial ^[13]

2.2 PRESSÕES NO CORPO HUMANO

Por mais que na maioria das vezes não se atente para isso, diariamente fenômenos intrinsecamente relacionados a princípios físicos ocorrem no corpo humano. Como exemplos relacionados a mecânica de fluidos, pode-se verificar a seguir dois fenômenos importantes à vida do ser humano que são a pressão nos olhos e a pressão arterial.

2.2.1 PRESSÃO SANGUÍNEA

Chama-se de pressão sanguínea a pressão manométrica que o sangue exerce sobre as artérias enquanto é bombeado para o corpo. Existem duas medidas de pressão sanguínea, que se baseiam no ciclo da contração cardíaca. Conforme Heneine (2006) elas são:

Pressão sistólica

A sístole ocorre com a contração e o esvaziamento do coração. Os átrios ejetam sangue nos ventrículos e esses nas artérias aorta (coração esquerdo) e artéria pulmonar (coração direito). Podemos dizer que a pressão sistólica é a que o sangue exerce sobre as artérias quando o coração bate.

Pressão diastólica

a diástole ocorre no relaxamento com entrada de sangue nas cavidades cardíacas e fechamento das válvulas arteriais. Podemos também dizer que a pressão diastólica é a que o sangue exerce sobre as artérias quando o coração relaxa entre suas batidas.

O coração funciona como uma “bomba” muscular que, no caso humano, pode exercer uma pressão manométrica máxima de cerca de 120 mmHg no sangue durante a contração (sístole) e de cerca de 80 mmHg no relaxamento (diástole). Uma pressão sistólica alta pode significar que o coração está bombeando forte demais ou que as artérias estão muito rígidas. Já uma pressão diastólica alta significa que as artérias apresentam resistência à passagem do sangue. ^[3]

O campo gravitacional exerce influência na circulação sanguínea, pois uma coluna de sangue de um centímetro de altura no campo gravitacional exerce uma pressão de 0,78 mmHg. Ao considerar-se o coração como referencial, tem-se que o campo g é contra a subida do sangue e a favor da descida. Assim, acima do coração, o campo g é contra a circulação arterial e a favor da venosa, enquanto que abaixo do coração o campo g passa a ser favorável a circulação arterial e contra a venosa.

Como mostra a figura 13, a pressão arterial assume valores diferentes em pontos do corpo humano situados em alturas diferentes. Porém um corpo deitado apresenta pressões sanguíneas semelhantes, tanto ao nível dos pés como da cabeça. ^[7]

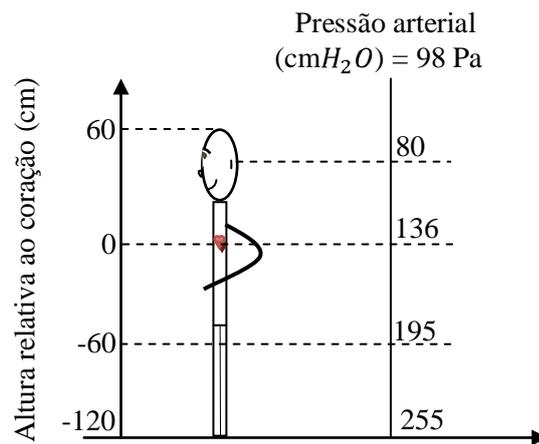


Figura 13 – Pressão no corpo humano X altura ^[7]

Se gravidade na terra de repente se tornasse três vezes maior, o sangue só subiria cerca de 43 cm acima do coração e não alcançaria o cérebro de uma pessoa. Esta situação pode ser produzida artificialmente acelerando o corpo a $3g$ ($\approx 30 \text{ m/s}^2$) em uma direção vertical para cima. Este efeito pode acontecer quando um avião levanta vôo, fato que pode causar no piloto um “black out” ou produzir poças de sangue nas pernas. Para evitar este último efeito foram projetadas meias elásticas especiais que comprimem as pernas e evitam ou reduzem acúmulos de sangue.

2.2.2 MEDIÇÃO DA PRESSÃO ARTERIAL

A medida da pressão arterial pode ser feita através de um esfigmomanômetro, como mostra a figura 14.



Figura 14 – Representação de aferimento de pressão arterial

O esfigmomanômetro consiste numa coluna de mercúrio com uma das extremidades ligada a uma bolsa, que pode ser inflada através de uma pequena bomba de borracha, que

deve envolver o braço a um nível aproximadamente igual ao do coração. A pressão do ar contido na bolsa é aumentada até que o fluxo de sangue seja interrompido na artéria. Ao se liberar gradualmente o ar da bolsa, através de um estetoscópio pode se perceber um som característico do retorno do fluxo do sangue na artéria. O primeiro som indicará a sístole, isto é, a máxima pressão sanguínea, cujo valor é indicado diretamente e, neste instante, o sangue volta a fluir de maneira turbulenta pela artéria. O último som ouvido através do estetoscópio indicará a diástole, menor valor da pressão sanguínea, quando o sangue flui estacionariamente. ^[7]

2.2.3 PRESSÃO INTRA-OCULAR

Pressionando-se os olhos com o dedo nota-se uma certa resistência do olho. Este fato mostra a existência da pressão intra-ocular, ou seja, da pressão interna dos olhos.

Os fluidos do globo ocular, ou seja, os humores aquoso e vítreo, que são claros e que transmitem luz à retina (parte fotossensível do olho), estão sob pressão e mantêm o globo numa forma e dimensão aproximadamente fixas. As dimensões do olho são críticas para uma boa visão – uma variação de somente 0,1 mm no seu diâmetro pode produzir um efeito significativo na claridade da visão e, conseqüentemente, no seu desempenho. A pressão manométrica no olho normal varia de 13 a 20 mmHg, com uma média de 15 mmHg.

O fluido na parte da frente do olho, o humor aquoso, é praticamente água. O olho produz continuamente humor aquoso, cerca de 5 ml/dia e um sistema de drenagem permite o excesso de humor escapar. Se ocorrer um bloqueio parcial neste sistema de drenagem, a pressão aumenta, fato que pode restringir o suprimento sanguíneo para a retina, o que afeta, em conseqüência, a visão. Esta condição, chamada *glaucoma*, produz uma visão de túnel nos casos moderados e cegueira nos casos severos.

Os médicos antigamente estimavam a pressão dentro do olho pelo "sentido", quando eles pressionavam o olho com seus dedos. Agora a pressão no olho é medida com vários instrumentos diferentes, chamados *tonômetros*, que medem a pressão ocular determinando a deflexão da córnea sob a ação de uma força conhecida. ^[7]

	Pressões Típicas (mmHg)
Pressão sangüínea arterial	
Máxima (sístole)	100 - 140
Mínima (diástole)	60 - 90
Grandes veias	< 1
Final de Artéria	30
Pressão no olho – humor aquoso	20

Tabela 4 – Valores típicos de pressão ^[14]

2.3 HIDRODINÂMICA

A hidrodinâmica é a parte da Mecânica de Fluidos que se dedica ao estudo dos fluidos em movimento. Ela é considerada como um dos ramos mais complexos da mecânica, pois embora cada gota de água ou partícula de fumaça tenha o seu movimento determinado pelas Leis de Newton, quando estas equações são aplicadas a todas as porções de um fluido elas resultam em equações que não podem ser resolvidas analiticamente. ^[3]

2.3.1 TIPOS DE ESCOAMENTO

Os tipos de escoamentos são definidos através de parâmetros físicos e pelo comportamento destes parâmetros ao longo do espaço e do tempo.

Quanto a características geométricas, das direções e coordenadas espaciais que descrevem os escoamentos, pode-se classificar os escoamento em:

- **Unidimensional:** quando as grandezas do escoamento variam em uma direção.
- **Bidimensional:** quando as grandezas do escoamento variam em duas direções.
- **Tridimensional:** quando as grandezas do escoamento variam em três direções.

Quanto a características temporais dos escoamentos, pode-se classificá-los em:

- **Permanente ou estacionário:** quando todas as grandezas características do escoamento são constantes no tempo.
- **Não Permanente:** quando ao menos uma grandeza do fluido muda no decorrer do tempo.

- **Uniforme:** quando as grandezas características do fluido são as mesmas em todos os pontos em todos os instantes.
- **Variado:** quando ao menos uma grandeza característica do fluido não assume o mesmo valor em todos os pontos.

Quanto a características do momento das partículas do fluido durante o escoamento, pode-se classificá-los em:

- **Rotacional:** quando partículas do fluido possuem uma velocidade angular em relação ao seu centro de massa.
- **Irrotacional:** quando as partículas do fluido se movimentam sem exibir movimento de rotação. ^[16]

2.3.2 TENSÃO TANGENCIAL OU DE CISALHAMENTO

Por definição, se a força F_t for aplicada uniformemente na superfície S , então a tensão tangencial ou de cisalhamento τ atuando nesta superfície será dada por:

$$\tau = \frac{F_t}{S} \quad (18)$$

A figura 15 ilustra a aplicação de tensões tangenciais num corpo sólido, de forma a mantê-lo em repouso.

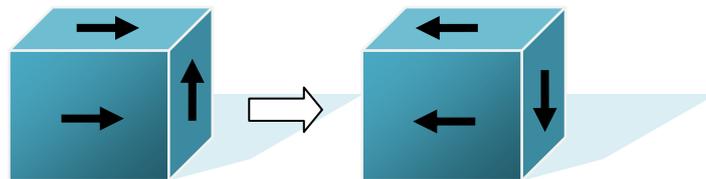


Figura 15 – Tensão tangencial ou de cisalhamento

Na figura 16 é mostrada uma camada de líquido de espessura h em repouso que, ao ser submetido a uma tensão tangencial, sofre uma deformação pelo "escorregamento" das camadas de líquido entre si.

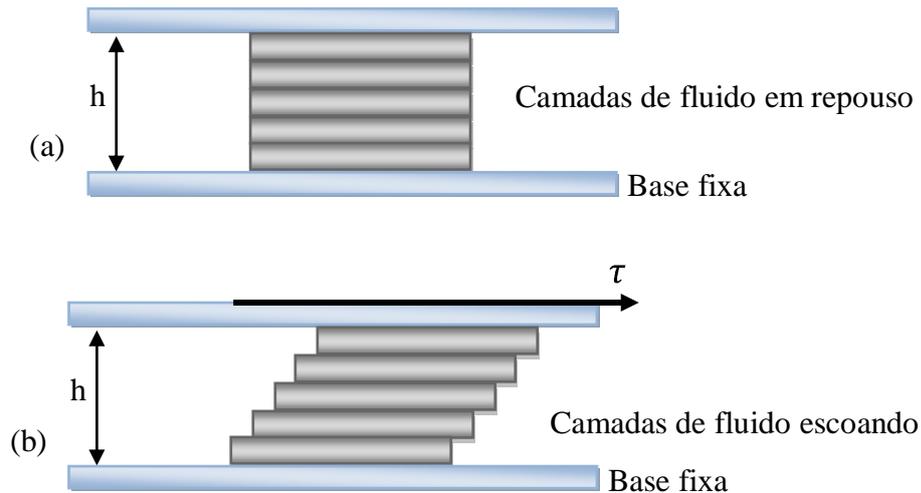


Figura 16 – (a) Camadas de fluido em repouso, (b) camadas de fluidos sob ação de tensão cisalhante ^[15]

Aplicando-se uma força tangencial F_t numa área S da interface entre uma superfície móvel e o líquido abaixo desta, produz-se um fluxo na primeira camada de líquido e esta na segunda e, assim, sucessivamente, até na última camada. Esta superfície pode ser um plano ou a parede de um tubo. A velocidade do fluxo que pode ser mantida por esta força pode ser controlada pela resistência interna do líquido, ou seja, pela viscosidade. ^[15]

2.3.3 TAXA DE CISALHAMENTO

Quando um fluido em repouso é submetido a uma tensão de cisalhamento suas camadas são colocadas em movimento, como mencionado acima. Para medir este movimento do fluido, define-se a taxa de cisalhamento pela variação da velocidade das camadas de fluido com relação a altura da placa fixa, isto é:

$$\gamma = \frac{dv}{dy} \quad (19)$$

O modelo de placas paralelas é um bom exemplo para diferenciar tensão de cisalhamento de taxa de cisalhamento, como ilustrado na figura 17. Nestes dois casos a tensão de cisalhamento é a mesma, mas como h_1 é maior que h_2 , a taxa de cisalhamento no primeiro caso (a) é menor que no segundo (b):

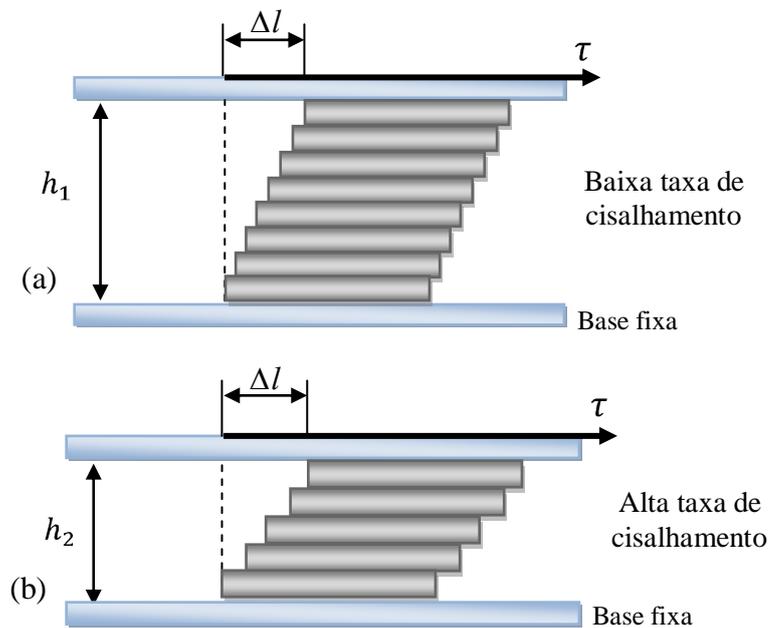


Figura 17 – Variação da taxa cisalhamento com variação apenas da espessura do líquido cisalhado ^[15]

2.3.4 DEFINIÇÃO DE VISCOSIDADE

Um fluido estacionário não sofre tensões viscosas, mas num fluido escoando os elementos de fluido estão continuamente sofrendo deformações devido à diferença de velocidade entre seus pontos. Em um sólido ideal, admite-se que as distâncias entre seus pontos não se alteram, sendo o movimento restrito às combinações de translação e rotação, sem deformação.

Naturalmente, a aplicação de uma tensão tangencial num fluido produz uma taxa de cisalhamento proporcional a esta tensão. A constante de proporcionalidade é chamada de viscosidade η do fluido, isto é,

$$\eta = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{F/S}{dv/dy} \quad (20)$$

Considerações básicas relacionadas a tensão de cisalhamento ou tensão tangencial são as seguintes:

- As alterações em um fluido submetido a tensões é que os difere fundamentalmente dos sólidos;
- Para que haja fluxo o fluido deve sofrer cisalhamento;
- “Ao contrário dos sólidos, um fluido não pode equilibrar uma força tangencial, por menor que ela seja.” [1]

2.3.5 CAMPO DE VELOCIDADE

Num fluido em escoamento tem-se que as “partículas” (pequenas porções) que compõe o fluido se deslocam com uma certa velocidade. Pode-se, por exemplo, determinar a velocidade do fluido num ponto P jogando-se um corante neste ponto e, com auxílio de uma câmera fotográfica, determinar o deslocamento da partícula que estava no ponto P e seu vetor velocidade.^[1]

Uma vez determinado o vetor velocidade de um fluido em vários pontos num instante, pode-se obter então o campo de velocidade do fluido neste instante e em qualquer instante posterior, isto é, pode-se determinar um conjunto muito grande de vetores velocidade das partículas do fluido em vários instantes.

2.3.6 LINHAS DE CORRENTES

Conhecendo-se o campo de velocidade de um fluido num instante pode-se determinar as linhas de corrente neste instante traçando-se linhas imaginárias, orientadas na direção do movimento das partículas, de forma que por cada ponto da linha o vetor velocidade das partículas naquele ponto sejam tangentes à linha de corrente.

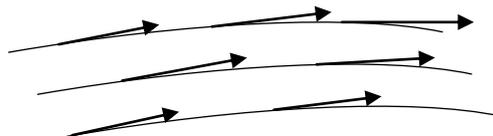


Figura 18 – Linhas de corrente

Por definição, pode-se ver que duas linhas de corrente não podem se cruzar, pois isto significaria que a partícula de fluido no ponto onde as linhas se cruzam se deslocaria em duas direções distintas num mesmo instante, o que é absurdo.

2.3.7 TUBO DE CORRENTE

Uma vez conhecidas as linhas de corrente de um fluido num certo instante pode-se construir tubos de corrente, traçando-se simplesmente as linhas de corrente que passam por uma determinada curva fechada no interior de um fluido.

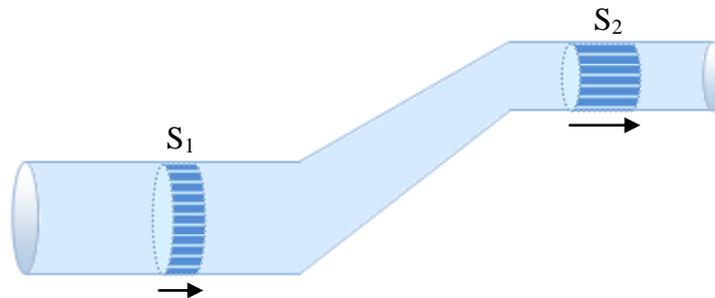


Figura 19 – Representação de um tubo de corrente.

2.3.8 COMPORTAMENTOS PARTICULARES DAS LINHAS E TUBOS DE CORRENTE

Quando um fluido escoar de forma não permanente, o campo de velocidades é diferente a cada instante e, assim, as linhas e tubos de correntes se movem ao longo do tempo. Entretanto, no caso de um escoamento estacionário, o campo de velocidade, as linhas de corrente e os tubos de corrente são fixos. Isto implica que as paredes de um tubo de corrente se comportam como se fossem rígidas, pois nenhuma partícula de fluido no interior do tubo poderá atravessar suas paredes pois, se isto ocorrer, haverá um cruzamento de duas linhas de corrente.

3. EXPERIMENTO DE REYNOLDS

Em 1883 Osborn Reynolds realizou um experimento com o objetivo de visualizar o padrão de escoamento da água através de um tubo de vidro, com o auxílio de um corante. Através deste experimento determinou-se a existência de escoamento laminar, escoamento turbulento e ainda o escoamento de transição, ou seja, o escoamento intermediário entre os dois citados primeiramente. ^{[11][17]}

Na figura 20 temos a ilustração do aparato utilizado por Reynolds no experimento.

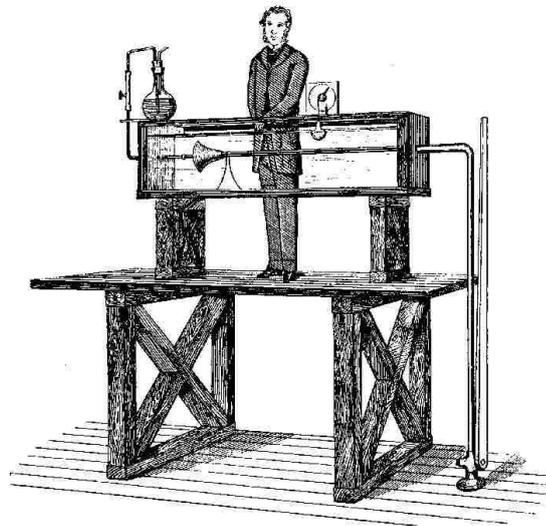


Figura 20 - Ilustração do aparato experimental de Reynolds ^[17]

O aparato tinha as seguintes características:

- Dimensões do tanque 1,83 m x 5,5 m x 5,5 m.
- Equipamentos principais: Tubo de vidro, convergente cônico de madeira, tubo metálico, válvula para controle de vazão (com haste longa de comando) e sistema de injeção de líquido colorido.

Segundo Heneine (2006), como resultado do experimento obteve-se o número de Reynolds, uma grandeza adimensional que indica o limite entre o fluxo laminar e turbulento, dado pela relação:

$$N = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\eta} \quad (21)$$

onde

N é o número de Reynolds

v é a velocidade média do fluido

d é o diâmetro do tubo

ρ é a densidade do fluido

η é a viscosidade cinemática do fluido.

Assim, por exemplo, quando este número é maior que 2.000 o escoamento está ocorrendo de modo turbulento ou está na iminência deste.

A tabela abaixo exprime os valores do número de Reynolds para os diversos tipos de escoamentos existentes.

Nº de Reynolds	Tipo de Escoamento
$N < 2000$	<i>Laminar</i>
$2000 < N < 2300$	<i>de Transição</i>
$N > 2300$	<i>Turbulento</i>

Tabela 5 – Valores do Número de Reynolds / Tipos de escoamento

3.1 ESCOAMENTO LAMINAR

Quando $N < 2000$ tem-se um escoamento laminar ou lamelar, que ocorre sob regime permanente.

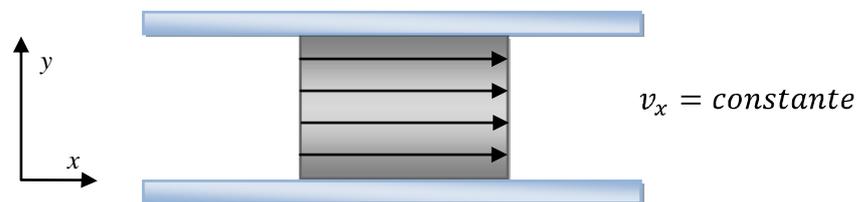


Figura 21 – Velocidade num escoamento laminar

Num escoamento laminar as partículas descrevem trajetórias paralelas e as linhas de correntes são fixas e descrevem o movimento das partículas do fluido conforme ilustrado na figura 21. Neste escoamento não existe redemoinhos no interior da massa fluida e o

movimento se faz de forma silenciosa. É o que ocorre, por exemplo, com ar durante uma respiração tranqüila. ^[19]

3.2 ESCOAMENTO DE TRANSIÇÃO

Este escoamento representa a passagem do escoamento laminar para o turbulento ou vice-versa. Como mostra a tabela 5, ele ocorre quando $2000 < N < 2300$.

3.3 ESCOAMENTO TURBULENTO

Este escoamento, que apresenta o fenômeno da turbulência, é também chamado de escoamento não-permanente e é importante observarmos que o fato de ser “turbulento” se deve unicamente ao escoamento, não sendo característica intrínseca do fluido. Na prática, o escoamento dos fluidos quase sempre é turbulento.

Neste tipo de fluxo é possível observar que as partículas se movimentam de maneira caótica e, diferentemente do fluxo laminar, a velocidade das partículas de fluido apresenta componentes transversais ao movimento geral do conjunto do fluido.

Quando há obstáculos à respiração normal nas vias aéreas, o fluxo de ar nos tubos respiratórios é turbulento. Este tipo de escoamento também ocorre nas bifurcações e nos segmentos onde o diâmetro do tubo varia abruptamente. ^[19]

4 MASSA ATRAVESSANDO UM A SECÇÃO TRANSVERSAL DE UM TUBO

Seja um tubo de corrente de área transversal S através do qual escoar um fluido de densidade ρ com a mesma velocidade v através de cada ponto da superfície S . Neste caso, se a velocidade das partículas for perpendicular à superfície S , tem-se que num intervalo de tempo Δt o fluido que passou por S se deslocou por uma distância $\Delta l = v\Delta t$, ocupando um volume $\Delta V = v\Delta tS$. Assim, neste intervalo de tempo Δt , passa através da superfície S uma massa de fluido dada por:

$$\Delta m = \rho v S \Delta t \quad (22)$$

4.1 EQUAÇÃO DA CONTINUIDADE

A equação da continuidade é o enunciado matemático do fato de que num escoamento estacionário a taxa efetiva de fluxo de massa que adentra a qualquer superfície fechada é igual à taxa de acréscimo de massa dentro desta superfície. ^[11]

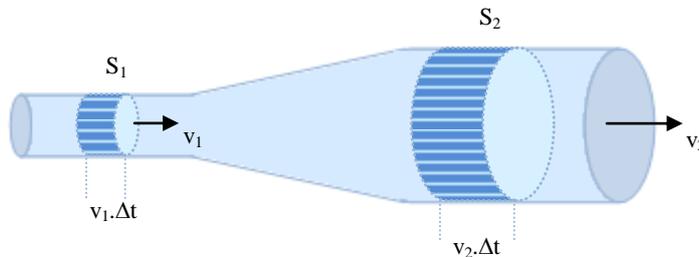


Figura 22 – Representação de um tubo de escoamento (equação da continuidade)

Seja então um tubo de corrente através do qual um fluido escoar em estado estacionário. Sendo S_1 uma área transversal do tubo na qual o fluido atravessa a superfície com a mesma velocidade v_1 perpendicular a superfície S_1 , tem-se que num intervalo de tempo Δt passa por S_1 uma massa de fluido dada por

$$\Delta m_1 = \rho_1 S_1 v_1 \Delta t \quad (23)$$

Sendo S_2 uma outra área transversal do tubo onde o fluido escoar com a mesma velocidade v_2 , tem-se que no intervalo de tempo Δt passa por S_2 uma massa de fluido dada por

$$\Delta m_2 = \rho_2 S_2 v_2 \Delta t \quad (24)$$

Sendo o escoamento estacionário, a massa de fluido existente entre estas seções deve permanecer constante, o que implica que a massa que entra é igual a massa que sai, isto é:

$$\Delta m_1 = \Delta m_2$$

o que implica em:

$$\rho_1 S_1 v_1 = \rho_2 S_2 v_2$$

Se o fluido é incompressível, temos que $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ e pode-se escrever que:

$$S_1 v_1 = S_2 v_2$$

A relação acima mostra então claramente que em partes de um tubo de maior área transversal a velocidade de escoamento é menor.

4.2 EQUAÇÃO DE BERNOULLI

Daniel Bernoulli (1700-1782) foi um físico e matemático suíço do século XVIII que estabeleceu uma das equações mais utilizadas na mecânica de fluidos, a Equação de Bernoulli, que relaciona as grandezas físicas de uma mesma linha de corrente.

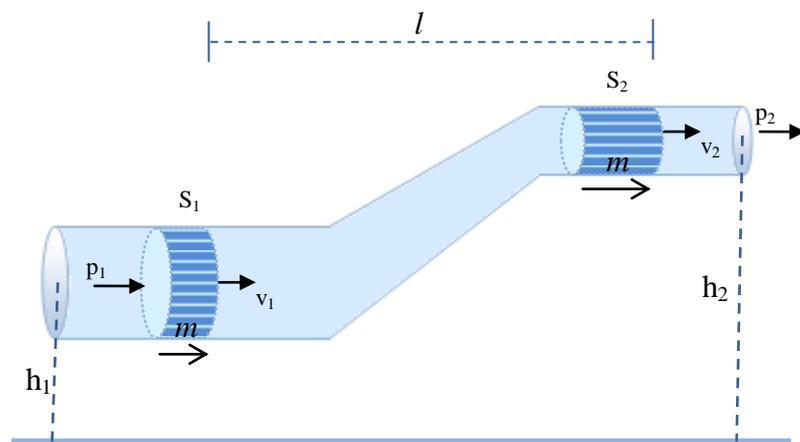


Figura 23 - Representação de um tubo de escoamento (equação da Bernoulli)

Para demonstrar a equação de Bernoulli iremos utilizar o teorema da energia cinética que diz que o trabalho W das forças externas sobre um corpo é igual a variação da energia cinética ΔK deste corpo, isto é:

$$W = \Delta K \quad (25)$$

No caso do escoamento de fluido com base na figura 24, temos que a variação da energia cinética da porção de fluido num intervalo de tempo Δt é:

$$\Delta K = \frac{1}{2} \Delta m v_2^2 - \frac{1}{2} \Delta m v_1^2 \quad (26)$$

onde Δm é a massa do fluido existente em S_1 ou em S_2 .

O trabalho W será a soma do trabalho W_g realizado pela força gravitacional, que é negativo e dado por:

$$W_g = -\Delta m g (h_2 - h_1) = -\rho g \Delta V (h_2 - h_1) \quad (27)$$

e os trabalhos de pressão que o fluido exerce na porção de fluido considerada. Chamando-se de W_1 o trabalho de pressão realizado sobre a extremidade esquerda do tubo e de W_2 o trabalho de pressão realizado pelo o sistema na extremidade direita, temos que:

$$W_1 = F_1 x_1 \quad \text{e} \quad W_2 = F_2 x_2 \quad (28)$$

Assim, podemos escrever o teorema da energia cinética como:

$$W = W_1 + W_2 + (-W_g) = \Delta K$$

Substituindo-se agora os valores de W_1 , W_2 e W_g , temos que:

$$F_1 x_1 - F_2 x_2 - \rho g \Delta V (h_2 - h_1) = \Delta K$$

que é igual a

$$p_1 S_1 x_1 - p_2 S_2 x_2 - \rho g \Delta V (h_2 - h_1) = \frac{1}{2} \Delta m v_2^2 - \frac{1}{2} \Delta m v_1^2$$

Considerando que $\Delta m = \rho \Delta V$ e que $S_1 x_1 = S_2 x_2 = \Delta V$ tem-se que

$$p_1 \Delta V - p_2 \Delta V - \rho \Delta V g (h_2 - h_1) = \frac{1}{2} \rho \Delta V v_2^2 - \frac{1}{2} \rho \Delta V v_1^2$$

$$-\Delta V (p_2 - p_1) - \rho \Delta V g (h_2 - h_1) = \frac{1}{2} \rho \Delta V (v_2^2 - v_1^2)$$

Com isto, obtém-se finalmente:

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 = p_2 + \rho g h_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (29)$$

Como esta relação independe da área do tubo de corrente, pode-se aplicar esta relação a um tubo de área infinitesimal, ou seja, a uma linha de corrente. Assim, pode-se escrever a equação de Bernoulli dizendo que para qualquer ponto de um linha de corrente devemos ter

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho g h = \text{constante} \quad (30)$$

Em particular, ao pensar se pensarmos em um fluído em repouso como um fluído que se desloca muito lentamente, de forma que as velocidades em cada ponto podem ser desprezadas, isto é $v_1 = v_2 = 0$, obtém-se:

$$p_1 = p_2 + \rho g (h_2 - h_1)$$

que é a relação conhecida com o Teorema de Stevin.

Por outro lado, quando o escoamento do fluído é horizontal, isto é, $h_1 = h_2$, a equação de Bernoulli assume a forma mais simples, sendo dada por:

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (31)$$

Pode-se, através da equação de Bernoulli, afirmar que “se a velocidade de um elemento de fluido aumenta quando ele se desloca ao longo de uma linha de corrente horizontal, a pressão do fluido deve diminuir e vice-versa.”

4.2.1 TUBO DE VENTURI

Giovanni Battista Venturi (1746-1822), físico e inventor italiano, idealizou o tubo de Venturi, que permite medir a velocidade de escoamento de um fluido, sendo considerado o melhor arranjo experimental para testar a validade da equação de Bernoulli.

O tubo de Venturi é utilizado para fluxos horizontais, onde não há variação de energia potencial gravitacional. Neste caso, a Equação de Bernoulli assume a seguinte forma:

$$p + \frac{\rho v^2}{2} = \text{constante} \quad (32)$$

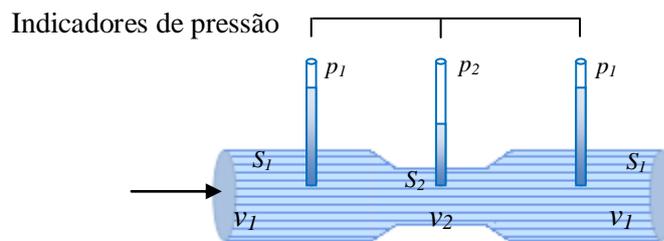


Figura 24 – Tubo de Venturi

No tubo ilustrado na figura 25 colocam-se tubos indicadores de pressão e observa-se que na parte mais larga (S_1) a pressão é maior do que na parte mais estreita (S_2). O contrário acontece com a velocidade, que na parte mais larga é menor (v_1) e, na mais estreita, maior (v_2).

Considerando-se a equação da continuidade $S_1 v_1 = S_2 v_2$, tem-se $v_1 < v_2$. Por outro lado, como $v_1 < v_2$, da equação de Bernoulli tem-se que:

$$p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} \quad \Rightarrow \quad p_1 > p_2 \quad (33)$$

4.3 EQUAÇÃO DE POISEUILLE

A equação de Poiseuille descreve o escoamento laminar de um fluido viscoso dentro de um tubo. Em resultado, Poiseuille obteve que a taxa de escoamento Q (volume por unidade de tempo) de um fluido de viscosidade η entre as extremidades de um tubo de raio r e sob uma diferença de pressão $\Delta p = p_1 - p_2$ é dada por

$$Q = \frac{\pi r^4 (p_1 - p_2)}{8 \eta L} \quad (34)$$

Como se observa, a taxa de escoamento é proporcional a quarta potência do raio do tubo, o que implica que pequenas diminuições do raio do tubo refletem numa diminuição considerável da taxa de escoamento.

A equação de Poiseuille descreve bem o escoamento do sangue pelas artérias e veias e o movimento do ar nos tubos respiratórios do corpo humano. ^{[11][19]}

CONCLUSÕES

Mecânica de Fluidos é uma área que “abre um leque” de opções quase que inesgotáveis para se explorar, por exemplo, dentro dos ramos da indústria e da hemodinâmica, o que tornou até difícil ter que restringir esta pesquisa aos temas apresentados ao considerar que seria uma “perda” não abordar os temas que aqui não constam.

Ao longo desta pesquisa, apesar de não ter avançado à prática experimental, foi possível observar que o contato, mesmo que teórico, com o assunto produz naturalmente um aumento na percepção de ocorrências de fenômenos que envolvem fluidos, mostrando que não se deve menosprezar o conhecimento teórico, o qual serve de base à prática.

Observou-se ainda a contribuição que é dada ao longo da história por estudiosos como Torricelli e Bernoulli dentre outros que perpetuaram seus nomes por causa das contribuições dadas por eles em “pequenas parcelas”, porém que fazem a diferença para os estudiosos de hoje.

REFERÊNCIAS

- 1 - NUSSENZVEIG, Herch Moyses., *Curso de Física Básica, vol 2 – Fluidos, Oscilações e Ondas e Calor*. 4 ed. São Paulo: Ed Edgard Blücher, 2002.
- 2- Disponível em <http://www.giltonepedro.com.br/docs/artigo03_variacao_densidade.pdf>, dezembro 2009 .
- 3 - HENEINE, Ibrahim Felipe. *Biofísica básica*. São Paulo: Atheneu, 2006.
- 4 - GONÇALVES, Dalton. *Física: Mecânica*. 3 ed. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1979
- 5 – Disponível em: <http://www.mspc.eng.br/fldetc/fluid_0110.shtml> abril. 2010.
- 6 – Disponível em: <<http://www.ipem.sp.gov.br/5mt/unidade.asp?vpro=mecanica>>, dezembro 2009.
- 7 - OKUNO, Emico; CALDAS, Iberê Luiz.; CHOW, Cecil. *Física para ciências biológicas e biomédicas*. São Paulo: Harbra, 1982.
- 8 – Disponível em: <<http://profs.ccems.pt/OlgaFranco/10ano/biomoleculas.htm>>, dezembro 2009.
- 9 – Disponível em: <<http://www.qmc.ufsc.br/qmcweb/artigos/agua.html>>, dezembro 2009.
- 10 – Disponível em: <http://www.novas.blogspot.com/2008_05_01_archive.html>, dezembro de 2009.
- 11 - SEARS, Francis Weston; ZEMANSKY, Mark W.; YOUNG, Hugh D.. *Física*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1984-2000

12 - HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. Fundamentos de Física 1-Mecânica. 6. Ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2002.

13 – Disponível em:

<<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/fluidos/tension/introduccion/introduccion.htm>>, setembro de 2009.

14 - Disponível em: < <http://bertolo.pro.br/Biofisica/Fluidos/Pressao2.htm>>, setembro de 2009.

15 – Disponível em: <http://www.freedom.inf.br/artigos_tecnicos/hc56/ricardopedro.asp>, setembro de 2009.

16 - Disponível em: <<http://www2.ufersa.edu.br/portal/view/uploads/setores>>, setembro de 2009.

17 – Disponível em: <<http://www.eng.man.ac.uk/historic/reynolds/oreyna.htm>>, setembro de 2009.

18 - Disponível em:

<http://www.ana.gov.br/AcoesAdministrativas/CDOC/ProducaoAcademica/Antonio%20Cardoso%20Neto/Elementos_de_Mecanica_dos_Fluidos.pdf>, setembro de 2009.

19 - GARCIA, Eduardo A. C.. Biofísica. São Paulo: Sarvier, 2002.