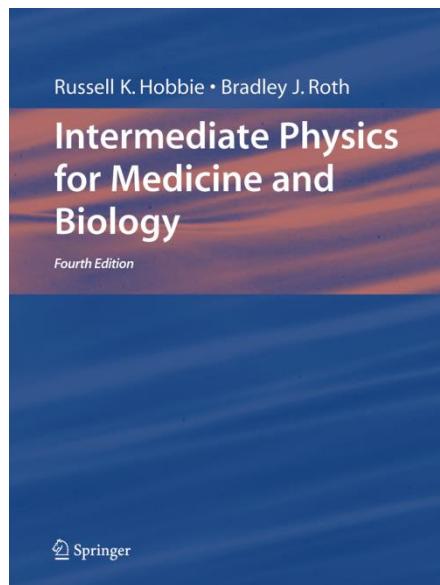


Capítulo 1

Mecânica



Cap. 1 - Mecânica

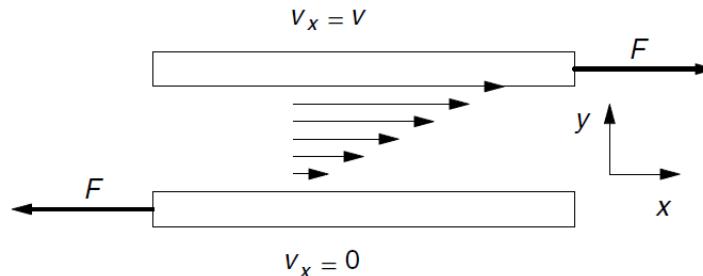
1 Mechanics

- 1.1 Distances and Sizes
- 1.2 Forces and Translational Equilibrium
- 1.3 Rotational Equilibrium
- 1.4 Vector Product
- 1.5 Force in the Achilles Tendon
- 1.6 Forces on the Hip
- 1.7 The Use of a Cane
- 1.8 Work
- 1.9 Stress and Strain
- 1.10 Shear
- 1.11 Hydrostatics
- 1.12 Buoyancy
- 1.13 Compressibility
- 1.14 Viscosity
- 1.15 Viscous Flow in a Tube
- 1.16 Pressure–Volume Work
- 1.17 The Human Circulatory System
- 1.18 Turbulent Flow and the Reynolds Number

Viscosidade

- **Definição:**

- Vamos considerar o fluxo de um fluido em velocidade baixa (não turbulento), de modo que as linhas de fluxo (*streamlines*) sejam suaves
 - A linha de fluxo é tangente ao vetor velocidade do fluido em cada ponto ao longo de seu caminho. Não há mistura de fluido entre as linhas de fluxo: o fluxo é laminar (em camadas)
- Um fluido pode sofrer uma tensão de cisalhamento viscoso se o esforço de cisalhamento for variável. Uma maneira de criar esta situação é imergir em um fluido duas placas paralelas de área S e mover uma paralelamente à outra como na Fig. 1.26



- Se o fluido em contato com cada placa "grudar" nelas, o fluido em contato com a placa inferior ficará em repouso e aquele em contato com a placa superior se moverá com a velocidade dela ("no-slip" boundary condition)

Viscosidade

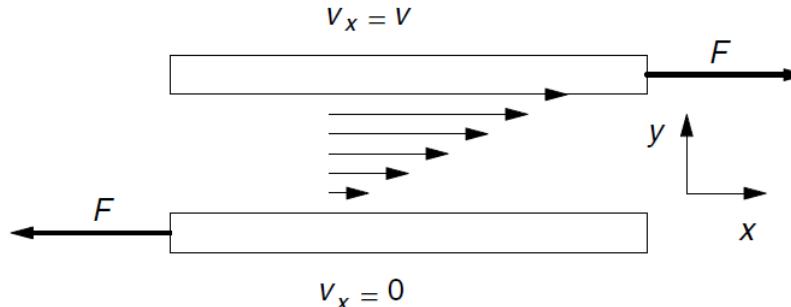


FIGURE 1.26. Forces \mathbf{F} and $-\mathbf{F}$ are needed to make the top plate move in a viscous fluid while the bottom plate remains stationary. The velocity profile is also shown.

- Como resultado da "*no-slip*" boundary condition, o fluido move-se paralelamente entre as placas, com uma velocidade que depende da posição (Fig. 1.26)
- A variação de velocidade entre as placas dá origem a um gradiente de velocidades dv_x/dy

Viscosidade

- Para manter a placa superior em movimento (com $v = v_x$) e a placa inferior estacionária, é necessário exercer uma força em cada placa conforme a figura.
- Em geral, a tensão de cisalhamento (ou força por unidade de área) é proporcional ao gradiente de velocidade de fluxo, com η sendo o coeficiente de viscosidade:

$$\frac{F}{S} = \eta \frac{dv_x}{dy}. \quad (1.33)$$

- Esta equação dá a força exercida pelo fluido acima de um plano a uma altura y sobre o fluido no plano imediatamente abaixo
- Fluidos que se movem de acordo com esta equação são chamados **fluidos newtonianos** (há muitas exceções)

Fluxo viscoso em um tubo

- Considere o fluxo viscoso laminar de um fluido em um tubo de raio constante R_p e comprimento Δx
 - Por enquanto, vamos ignorar a força gravitacional
- A pressão na extremidade esquerda desse segmento de tubo é $p(x)$ e na direita, $p(x + \Delta x)$
- Vamos considerar que o fluido não está acelerado → a força total sobre qualquer elemento de volume do fluido é zero
- Nesse caso, o perfil de velocidades deve ser como mostrado na Fig. 1.27: zero nas paredes e máximo no centro

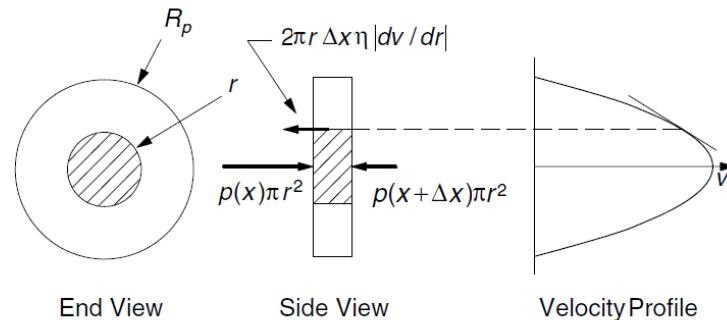


FIGURE 1.27. Longitudinal and transverse cross sections of the tube. Newton's first law is applied to the shaded volume.

Fluxo viscoso em um tubo $\rightarrow v(r)$

- Quais são forças que atuam no fluido contido no cilindro sombreado da Fig. 1.27?
- Excluindo-se a gravidade, há apenas **três forças**:
 - O fluido da esquerda exerce uma força $\pi r^2 p(x)$ pelo lado direito na direção x
 - O fluido da direita exerce uma força $-\pi r^2 p(x + \Delta x)$
 - O fluido que está fora da área sombreada, que se move mais lentamente, exerce uma força de atrito viscoso, para a esquerda, através da superfície cilíndrica de raio r, que é dada por $2\pi r \Delta x \eta |dv/dr|$

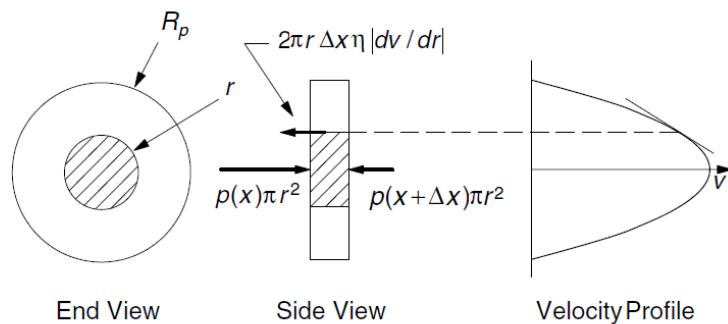


FIGURE 1.27. Longitudinal and transverse cross sections of the tube. Newton's first law is applied to the shaded volume.

Fluxo viscoso em um tubo $\rightarrow v(r)$

- Como o fluido não está acelerado (e lembrando que dv/dr é negativo), a soma das forças deve ser zero:

$$\pi r^2 [p(x) - p(x + \Delta x)] + 2\pi r \Delta x \eta (dv/dr) = 0, \quad (1.34)$$

- Rearranjando:

$$\frac{dv}{dr} = \frac{r}{2\eta} \left(\frac{p(x + \Delta x) - p(x)}{\Delta x} \right) = \frac{dp}{dx} \frac{r}{2\eta}. \quad (1.35)$$

- Integrando-se, obtemos:

$$\int dv = \frac{1}{2\eta} \left(\frac{dp}{dx} \right) \int r dr,$$

$$v(r) = \frac{1}{4\eta} \left(\frac{dp}{dx} \right) r^2 + A. \quad (1.36)$$

Fluxo viscoso em um tubo $\rightarrow v(r)$

- Para o fluxo à direita, dp/dx é negativo. Portanto, é conveniente escrever Δp como queda de pressão de x para $x+dx$:

$$\Delta p = p(x) - p(x + \Delta x)$$

- Assim, o 1º. termo de 1.36 torna-se $\rightarrow -(1/4\eta)(\Delta p/\Delta x)r^2$.
- A constante de integração A vem de considerar a "*no-slip boundary condition*": uma vez que a parede está em repouso, a velocidade do fluido nas paredes ($r = R_p$) é zero. O resultado final é

$$v(r) = \frac{1}{4\eta} \frac{\Delta p}{\Delta x} (R_p^2 - r^2). \quad (1.37)$$

- Temos, portanto, um perfil de velocidades parabólico

Definições

- i : a **taxa total de fluxo** (ou **fluxo volumétrico ou corrente de volume**) é o volume de fluido por segundo movendo-se através da seção de choque do tubo $\rightarrow [i]: \text{m}^3 \text{s}^{-1}$
- j_v : a **taxa de fluência volumétrica ou densidade de fluxo volumétrica** é o volume por unidade de área por unidade de tempo através de alguma área pequena no tubo $\rightarrow [j_v]: \text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{m}^{-2} = \text{m s}^{-1}$
- Na verdade, j_v é a velocidade do fluxo em um dado ponto

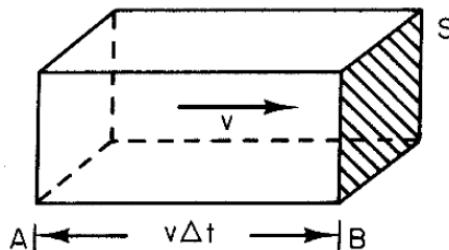


FIGURE 1.28. Flow of fluid across the plane at B .

$$j_v = \frac{(\text{volume transported})}{(\text{area})(\text{time})} = \frac{Sv\Delta t}{S\Delta t} = v. \quad (1.38)$$

Fluido de Poiseuille

- Para se obter a corrente volumétrica i , j_v deve ser integrado sobre a seção de choque do tubo:

$$i = \int_0^{R_p} j_v(r) 2\pi r dr,$$

$$i = \frac{2\pi}{4\eta} \frac{\Delta p}{\Delta x} \int_0^{R_p} (R_p^2 - r^2) r dr. \quad (1.39)$$

- Isso resulta em $i = \frac{\pi R_p^4}{8\eta} \frac{\Delta p}{\Delta x}$ (1.40)
- A Eq. (1.40) representa o fluxo de um fluido viscoso através de um tubo de raio de R_p devido a um gradiente de pressão $\Delta p/\Delta x$
 - Note-se que pequenas alterações de diâmetro causam grandes variações de fluxo

Efeitos de aceleração e da gravidade

- Vamos considerar agora o caso geral em que, além de viscosidade, o fluxo pode ser acelerado e sofrer ação da gravidade
- Para isso, levamos em conta **quatro contribuições** agindo em um fluido incompressível que flui em um tubo circular cujo raio pode variar:

$$\begin{aligned}\Delta p &= \int_{x_1}^{x_2} (dp/dx) dx \\ &= \Delta p_{\text{visc}} + \Delta p_{\text{grav}} + \Delta p_{\text{accel1}} + \Delta p_{\text{accel2}}.\end{aligned}\tag{1.42}$$

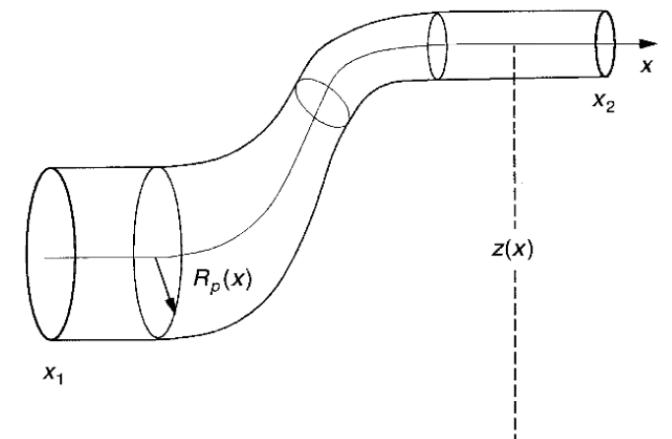


FIGURE 1.29. A pipe of circular cross section with radius and height varying along the pipe.

Efeitos de aceleração e da gravidade

- Como o fluido é incompressível, o fluxo total i não depende de x
 - Se o tubo estreita, a velocidade aumenta
- Vamos admitir que as variações de raio são suaves, de forma que se possa considerar o perfil de velocidades como sendo parabólico em qualquer ponto do tubo.
 - Podemos então tratar x como sendo uma distância ao longo de um tubo cilíndrico
- Se definirmos a velocidade média como sendo

$$\bar{v}(x) = \frac{i}{\pi R_p^2(x)}, \quad (1.43)$$

podemos usar (1.37) e (1.40) para reescrever o perfil de velocidades como

$$v(r, x) = 2\bar{v} \left[1 - \frac{r^2}{R_p^2(x)} \right] = \frac{2i}{\pi R_p^2(x)} \left[1 - \frac{r^2}{R_p^2(x)} \right]. \quad (1.44)$$

Efeitos de aceleração e da gravidade

$$v(r, x) = 2\bar{v} \left[1 - \frac{r^2}{R_p^2(x)} \right] = \frac{2i}{\pi R_p^2(x)} \left[1 - \frac{r^2}{R_p^2(x)} \right]. \quad (1.44)$$

- O 1º. termo de (1.42) é a pressão que deve vencer o atrito viscoso. Pode-se reescrever (1.35) como:

$$\frac{dp_{\text{visc}}}{dx} = \frac{2\eta}{r} \frac{dv}{dr}.$$

- Usando (1.44), obtém-se

$$\frac{dp_{\text{visc}}}{dx} = -\frac{8\eta i}{\pi R_p^4(x)}. \quad (1.45)$$

Efeitos de aceleração e da gravidade

- Integrando-se (1.45), obtém-se

$$\begin{aligned}\Delta p_{\text{visc}} &= - \int_{x_1}^{x_2} dp_{\text{visc}} = - \int_{x_1}^{x_2} \left(\frac{dp_{\text{visc}}}{dx} \right) dx \quad (1.46) \\ &= + \frac{8\eta i}{\pi} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{R_p^4(x)}.\end{aligned}$$

- Para ir além disso, seria necessário conhecer $R_p(x)$
- O termo seguinte p_{grav} tem a ver com a variação de pressão hidrostática dada pela Eq. (1.30) $\rightarrow p = p_0 - \rho g z$

$$\Delta p_{\text{grav}} = - \int_{x_1}^{x_2} dp_{\text{grav}} = - \int \frac{dp_{\text{grav}}}{dz} dz = \rho g(z_2 - z_1). \quad (1.47)$$

Efeitos de aceleração e da gravidade

- Os últimos dois termos de (1.42) são as diferenças de pressão necessárias para acelerar o fluido
- Se o fluxo for estacionário (i.e. a velocidade depende apenas da posição), haverá uma aceleração se a seção do choque do tubo variar
 - O 3º. termo está associado a esta aceleração. Vejamos como derivá-lo.
- Vamos considerar um pequeno trecho ds da *streamline* e uma pequena área dA perpendicular a ele
 - Note que ds é um deslocamento ao longo da *streamline* ao passo que dx é ao longo do eixo do tubo $\rightarrow dA.ds$ define um pequeno volume de fluxo
- Sejam ds e dA tão pequenos que v seja aproximadamente a mesma em todos os pontos dentro desse volume. A massa de fluido nesse volume será $dm = \rho.dA.ds$

Efeitos de aceleração e da gravidade

- Agora, ignorando-se viscosidade e gravidade, de forma que apenas a diferença de pressão esteja associada a aceleração, temos a força efetiva no volume:

$$dF = -\frac{dp}{ds} ds dA. \quad (1.48)$$

- A aceleração do fluido no elemento é

$$\frac{dv}{dt} = \frac{dF}{dm} = -\frac{\left(\frac{dp}{ds}\right) ds dA}{\rho ds dA} = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{dp}{ds}\right). \quad (1.49)$$

- Pela regra da cadeia $\rightarrow \frac{dv}{dt} = \left(\frac{dv}{ds}\right) \left(\frac{ds}{dt}\right) = v \left(\frac{dv}{ds}\right).$
- Portanto, $\frac{dp_{\text{accel1}}}{ds} = -\rho v \left(\frac{dv}{ds}\right).$ (1.50)

$$\begin{aligned} \Delta p_{\text{accel1}} &= - \int_{s_1}^{s_2} \left(\frac{dp_{\text{accel1}}}{ds}\right) ds = +\rho \int_{x_1}^{x_2} v \left(\frac{dv}{ds}\right) ds \\ &= \frac{\rho v_2^2}{2} - \frac{\rho v_1^2}{2}. \end{aligned} \quad (1.51)$$

Efeitos de aceleração e da gravidade

- O termo final Δp_{accel2} corresponde à variação de pressão necessária para acelerar o fluido entre os pontos 1 e 2 se a velocidade num ponto fixo estiver variando com o tempo
 - Isso acontece, p. ex., ao sangue que é acelerado ao ser ejetado do coração durante a sístole
- Para derivar esse termo, vamos imaginar novamente o pequeno trecho de *streamline* ds e a pequena área dA perpendicular a ele.
 - Vamos ignorar gravidade e viscosidade, assim como variações na velocidade devidas a variações de diâmetro do tubo
 - Ou seja, há aceleração apenas se a velocidade varia em um ponto fixo
- A força efetiva necessária para acelerar essa massa é dada pela diferença de pressão (1.48):

$$dF = -dA dp_{\text{accel2}} = dm \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right) = \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right) dA ds,$$

$$dp_{\text{accel2}} = -\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right) ds,$$

$$\Delta p_{\text{accel2}} = - \int_{s_1}^{s_2} dp_{\text{accel2}} = \rho \int_{s_1}^{s_2} \left(\frac{\partial v}{\partial t} \right) ds. \quad (1.52)$$

Equação generalizada de Bernoulli

- Juntando todos os efeitos vistos anteriormente, obtém-se a equação generalizada de Bernoulli:

$$p_1 - p_2 = \Delta p = \underbrace{\rho \int_{s_1}^{s_2} \frac{\partial v}{\partial t} ds}_{\Delta p_{\text{accel2}}} + \underbrace{\int_{s_1}^{s_2} \left(-\frac{dp_{\text{visc}}}{ds} \right) ds}_{\Delta p_{\text{visc}}} + \underbrace{\frac{\rho v_2^2}{2} - \frac{\rho v_1^2}{2}}_{\Delta p_{\text{accel1}}} + \underbrace{\rho g (z_2 - z_1)}_{\Delta p_{\text{grav}}} \quad (1.53)$$

O sistema circulatório humano

- O sistema circulatório tem duas partes: a circulação sistêmica (parte esquerda) e a circulação pulmonar (parte direita)
 - À medida que o coração bate, a pressão do sangue que deixa o coração sobe e desce
 - Pressão sistólica é a máxima, pressão diastólica é a mínima
 - Como o sangue é incompressível, o fluxo volumétrico total i permanece o mesmo em todos os níveis de ramificação da árvore vascular
 - Ver Tab. 1.4 (página seguinte): valores médios de pressão e de calibre de vasos.

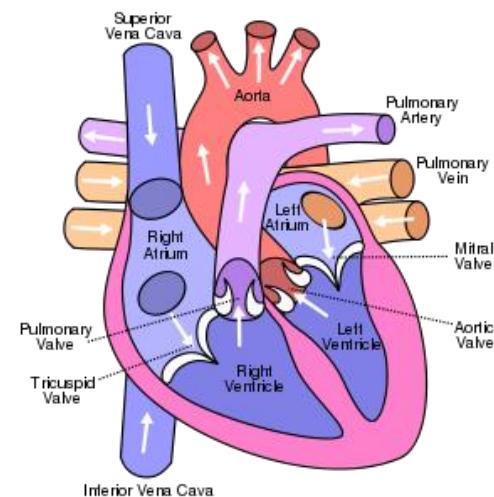
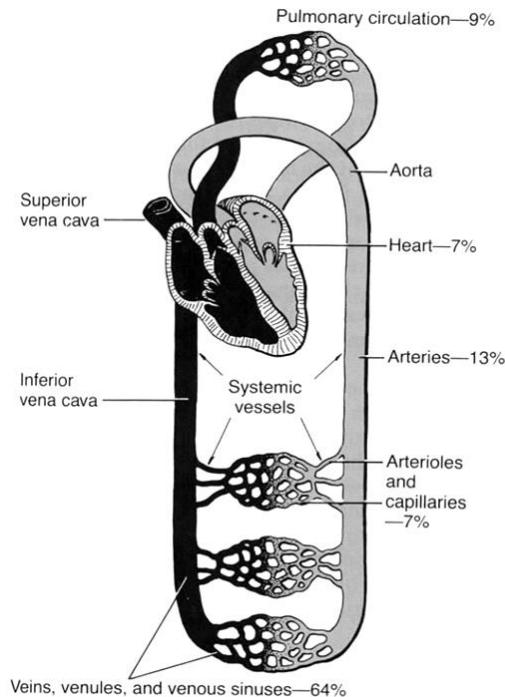


TABLE 1.4. Typical values for the average pressure at the entrance to each generation of the major branches of the cardiovascular tree, the average blood volume in certain branches, and typical dimensions of the vessels.

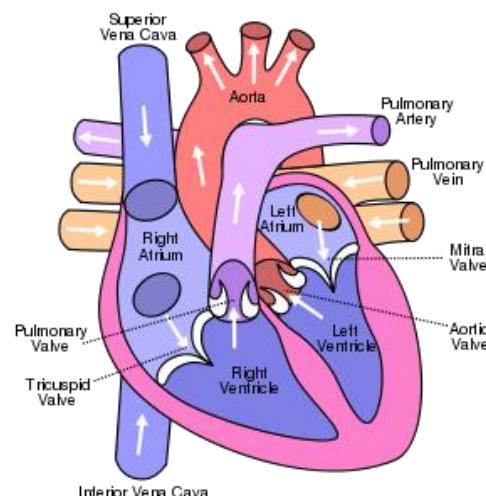
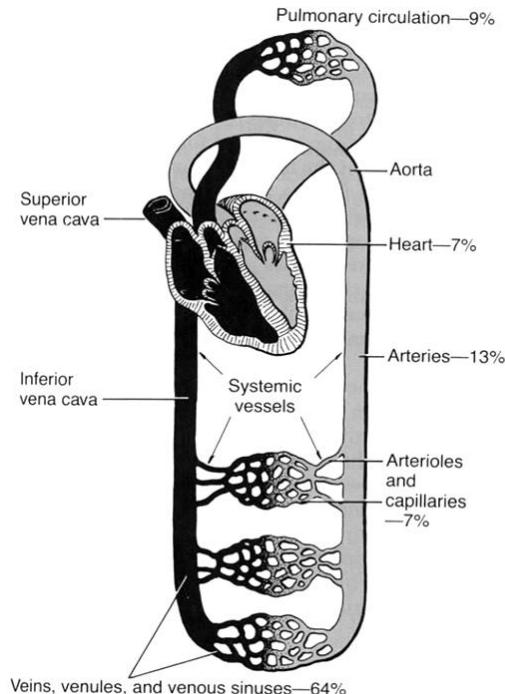
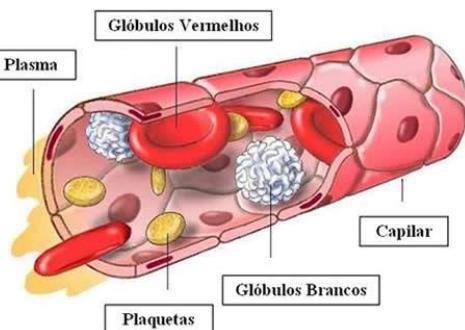
Location	Average pressure (torr)	Blood volume ^a (ml)	Diameter ^b (mm)	Length ^b (mm)	Wall thickness ^b (mm)	Avg. velocity ^b (m s ⁻¹)	Reynolds number at maximum flow ^c
Systemic circulation							
Left atrium	5						
Left ventricle	100						
Aorta	100	156	20	500	2.00	4.80×10^{-1}	9 400
Arteries	95	608	4	500	1.00	4.50×10^{-1}	1 300
Arterioles	86	94	0.05	10	0.2	5.00×10^{-2}	
Capillaries	30	260	0.008	1	0.001	1.00×10^{-3}	
Venules	10	470	0.02	2	0.002	2.00×10^{-3}	
Veins	4	2682	5	25	0.5	1.00×10^{-2}	
Vena cava	3	125	30	500	1.5	3.80×10^{-1}	3 000
Right atrium	3						
Pulmonary Circulation							
Right atrium	3						
Right ventricle	25						
Pulmonary artery	25	52					
Arteries	20	91					7 800
Arterioles	15	6					
Capillaries	10	104					
Veins	5	215					2 200
Left atrium	5						

^aFrom R. Plonsey (1995). Physiologic Systems. In J. R. Bronzino, ed. *The Biomedical Engineering Handbook*, Boca Raton, CRC Press, pp. 9–10.

^bFrom J. N. Mazumdar (1992). *Biofluid Mechanics*. Singapore, World Scientific, p. 38.

^cFrom W. R. Milnor (1989). *Hemodynamics*, 2nd. ed. Baltimore, Williams & Wilkins, p. 148.

$$\bar{v}(x) = \frac{i}{\pi R_p^2(x)}, \quad (1.43)$$



O sistema circulatório humano

- Define-se **resistência vascular R** de um segmento do sistema circulatório como a razão entre a diferença de pressão através desse segmento e o fluxo através dele:

$$R = \frac{\Delta p}{i}. \quad (1.57)$$

- De (1.40), vemos que

$$R = \frac{8\eta\Delta x}{\pi R_p^4}. \quad (1.58)$$

- A resistência decresce rapidamente com o aumento do raio do vaso

O sistema circulatório humano

- Se vasos com diferentes diâmetros estão conectados em série tal que o fluxo i seja o mesmo através deles e a queda de pressão total seja a soma da queda ao longo dos vasos, então a resistência total é a soma das resistências de cada vaso:

$$R_{\text{tot}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots . \quad (1.59)$$

- Se existem ramificações tais que vários vasos estejam em paralelo com a mesma queda de pressão em cada um, o fluxo total através de todas as ramificações é igual ao fluxo no vaso que alimenta essa rede. A resistência total é então dada por

$$\frac{1}{R_{\text{tot}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots . \quad (1.60)$$

- Ver aplicações no texto

$$\begin{aligned} i &= (60 \text{ ml beat}^{-1})(80 \text{ beat min}^{-1}) = 4800 \text{ ml min}^{-1} \\ &= 80 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}. \end{aligned}$$

O sistema circulatório humano

- A pressão no ventrículo esquerdo varia durante o ciclo cardíaco. Na Fig. 1.35, vemos essa pressão plotada em função do volume ventricular. O sentido do ciclo é anti-horário.
- O ventrículo enche com $p \sim 0$ até que $v > 60\text{ml}$. Para $v = 100\text{ ml}$, começa um período de contração a volume constante que faz a pressão ventricular subir até ultrapassar a pressão diastólica na aorta, e a válvula da aorta se abre. A contração continua e a pressão sobe ainda mais, mas o volume ventricular diminui com a sangue fluindo para a aorta. Aí o ventrículo relaxa. A válvula da aorta fecha quando a pressão ventricular cai abaixo da pressão na aorta.

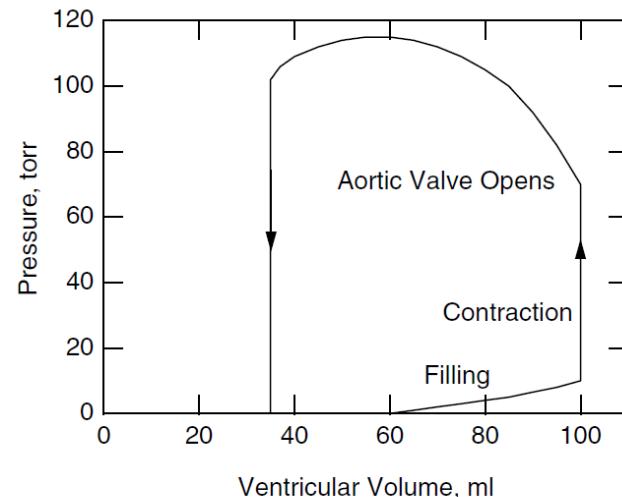


FIGURE 1.35. Pressure–volume relationship in the left ventricle. The curve is traversed counterclockwise with increasing time. The stroke volume is $100 - 35 = 65\text{ ml}$. Systolic pressure is 118 torr, and diastolic pressure is 70 torr. The ventricular pressure drops below diastolic while the pressure in the arteries remains about 70 torr because the aortic valve has closed and prevents back flow

Fluxo turbulento e número de Reynolds

- Vários aspectos da circulação podem ser modelados por um fluido de Poiseuille (Eq. 1.40). Há porém quatro efeitos (além de 1.42) que fazem esse modelo falhar:
 - Pode haver turbulência;
 - Há desvios de um perfil de velocidades parabólico;
 - As paredes dos vasos são elásticas;
 - A viscosidade aparente depende tanto da fração do volume sanguíneo ocupado pelas células vermelhas quanto do tamanho do vaso.
- A importância do fluxo turbulento (não laminar) é determinado por um número adimensional característico do sistema chamado **número de Reynolds** N_R , que é definido como

$$N_R = \frac{LV\rho}{\eta}, \quad (1.61)$$

- L é um comprimento característico do sistema
- V é uma velocidade característica do problema
- ρ é a densidade
- η é a viscosidade do fluido

Número de Reynolds

(versão Wikipedia)

- O coeficiente, número ou módulo de **Reynolds** (abreviado como **Re**) é um número adimensional usado em mecânica dos fluidos para o cálculo do regime de escoamento de determinado fluido sobre uma superfície. É utilizado, por exemplo, em projetos de tubulações industriais e asas de aviões.
- O seu significado físico é um quociente de forças: forças de inércia ($\nu\rho$) e forças de viscosidade (μ/D). É expressado como sendo

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

v - velocidade média do fluido

D - longitude característica do fluxo, o diâmetro para o fluxo no tubo

μ - viscosidade dinâmica do fluido

ρ - massa específica do fluido

Número de Reynolds

(versão Wikipedia)

- A significância fundamental do número de Reynolds é que o mesmo permite avaliar o tipo do escoamento (a estabilidade do fluxo) e pode indicar se flui de forma laminar ou turbulenta. Para o caso de um fluxo de água num tubo cilíndrico, admite-se os valores de 2.000 e 2.400 como limites.
- Desta forma, para valores menores que 2.000 o fluxo será laminar, e para valores maiores que 2.400 o fluxo será turbulento. Entre estes dois valores o fluxo é considerado como transitório.
- O número de Reynolds constitui a base do comportamento de sistemas reais, pelo uso de modelos físicos reduzidos.
- Um exemplo comum é o túnel aerodinâmico onde se medem forças desta natureza em modelos de asas de aviões, automóveis, edificações. Pode-se dizer que dois sistemas são dinamicamente semelhantes se o número de Reynolds for o mesmo para ambos.

Número de Reynolds

(Estimativa a la Hobbie)

- Considere-se uma diferença de pressão Δp atua sobre um segmento de um fluido de Poiseuille de comprimento Δx . A diferença entre as forças exercidas nas extremidades desse segmento é $\pi R_p^2 \Delta p$.
- Para uma velocidade média do fluido \bar{v} , o **trabalho efetivo** feito sobre o segmento pelos fluidos à montante e à jusante no intervalo de tempo Δt é $W_{visc} = \pi R_p^2 \Delta p \bar{v} \Delta t$
- Como o fluido não está acelerado, este trabalho é convertido em energia térmica. Podemos então resolver a Eq. (1.40) para Δp e usar (1.43) para escrever

$$W_{visc} = \pi R_p^2 \Delta p \bar{v} \Delta t = 8\eta \pi \bar{v}^2 \Delta x \Delta t.$$

- A energia cinética do fluido movendo-se em um cilindro de comprimento $\bar{v} \Delta t$ é

$$E_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{\rho \pi R_p^2 (\bar{v} \Delta t) \bar{v}^2}{2} = \frac{\rho \pi R_p^2 \bar{v}^3 \Delta t}{2},$$

- e a razão entre a energia cinética e o trabalho realizado é

$$\frac{E_k}{W_{visc}} = \frac{\rho \bar{v} R_p^2}{16\eta \Delta x} = \frac{1}{16\xi} \frac{\rho \bar{v} R_p}{\eta} = \frac{1}{16\xi} N_R.$$

- Nesta última passagem, usou-se $\Delta x = \xi R_b$

- **Ver valores de N_R na última coluna. O fluxo sanguíneo é laminar exceto na aorta ascendente e na artéria pulmonar principal, onde pode ocorrer turbulência durante o pico de fluxo.**

TABLE 1.4. Typical values for the average pressure at the entrance to each generation of the major branches of the cardiovascular tree, the average blood volume in certain branches, and typical dimensions of the vessels.

Location	Average pressure (torr)	Blood volume ^a (ml)	Diameter ^b (mm)	Length ^b (mm)	Wall thickness ^b (mm)	Avg. velocity ^b (m s ⁻¹)	Reynolds number at maximum flow ^c
Systemic circulation							
Left atrium	5						
Left ventricle	100						
Aorta	100	156	20	500	2.00	4.80×10^{-1}	9 400
Arteries	95	608	4	500	1.00	4.50×10^{-1}	1 300
Arterioles	86	94	0.05	10	0.2	5.00×10^{-2}	
Capillaries	30	260	0.008	1	0.001	1.00×10^{-3}	
Venules	10	470	0.02	2	0.002	2.00×10^{-3}	
Veins	4	2682	5	25	0.5	1.00×10^{-2}	
Vena cava	3	125	30	500	1.5	3.80×10^{-1}	3 000
Right atrium	3						
Pulmonary Circulation							
Right atrium	3						
Right ventricle	25						
Pulmonary artery	25	52					
Arteries	20	91					7 800
Arterioles	15	6					
Capillaries	10	104					
Veins	5	215					2 200
Left atrium	5						

^aFrom R. Plonsey (1995). Physiologic Systems. In J. R. Bronzino, ed. *The Biomedical Engineering Handbook*, Boca Raton, CRC Press, pp. 9–10.

^bFrom J. N. Mazumdar (1992). *Biofluid Mechanics*. Singapore, World Scientific, p. 38.

^cFrom W. R. Milnor (1989). *Hemodynamics*, 2nd. ed. Baltimore, Williams & Wilkins, p. 148.