

Física do Corpo Humano

Prof. Adriano Mesquita Alencar
Dep. Física Geral
Instituto de Física da USP



Circulação

COI

Pressão (Definição)



$$\text{Pressão} = \frac{\text{Força}}{\text{Área}}$$

$$\begin{aligned} P &= \frac{F}{A} \\ &= \frac{mg}{A} \frac{h}{h} \\ &= \rho gh \end{aligned}$$

Peso=100N



$A = 0.1 \text{ m}^2$
 $P = 1000 \text{ Pascals}$



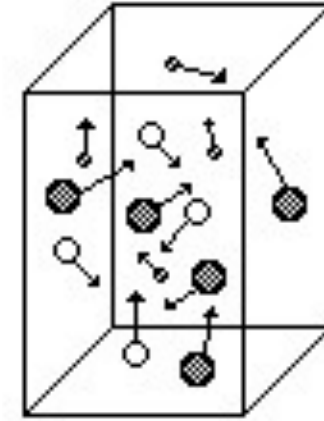
$A = 0.01 \text{ m}^2$
 $P = 10,000 \text{ Pascals}$

Mesmo peso
Área diferente
Pressão diferente

Pressão (Teoria Cinética dos Gases)

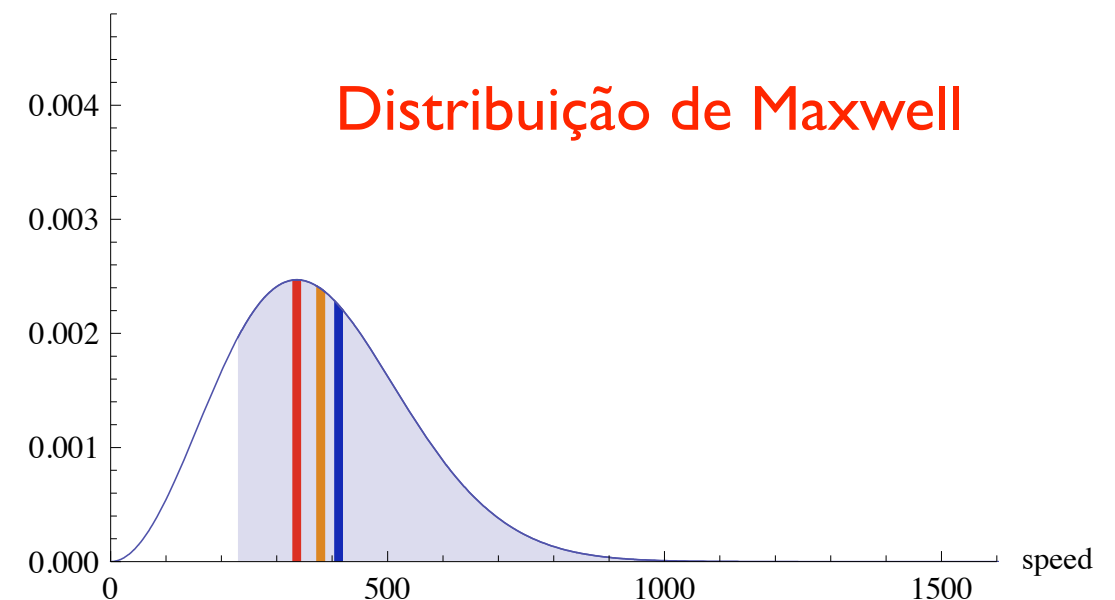
Pilares da Teoria Cinética dos Gases

- O número de moléculas é muito grande, mas a separação é grande comparado com o tamanho das moléculas
- Moléculas movem aleatoriamente, todavia a distribuição das velocidades é constante
- Moléculas colidem entre si e nas paredes (como bolas de sinuca), nenhuma outra força é considerada
- Moléculas obedecem a lei de Newton para o movimento

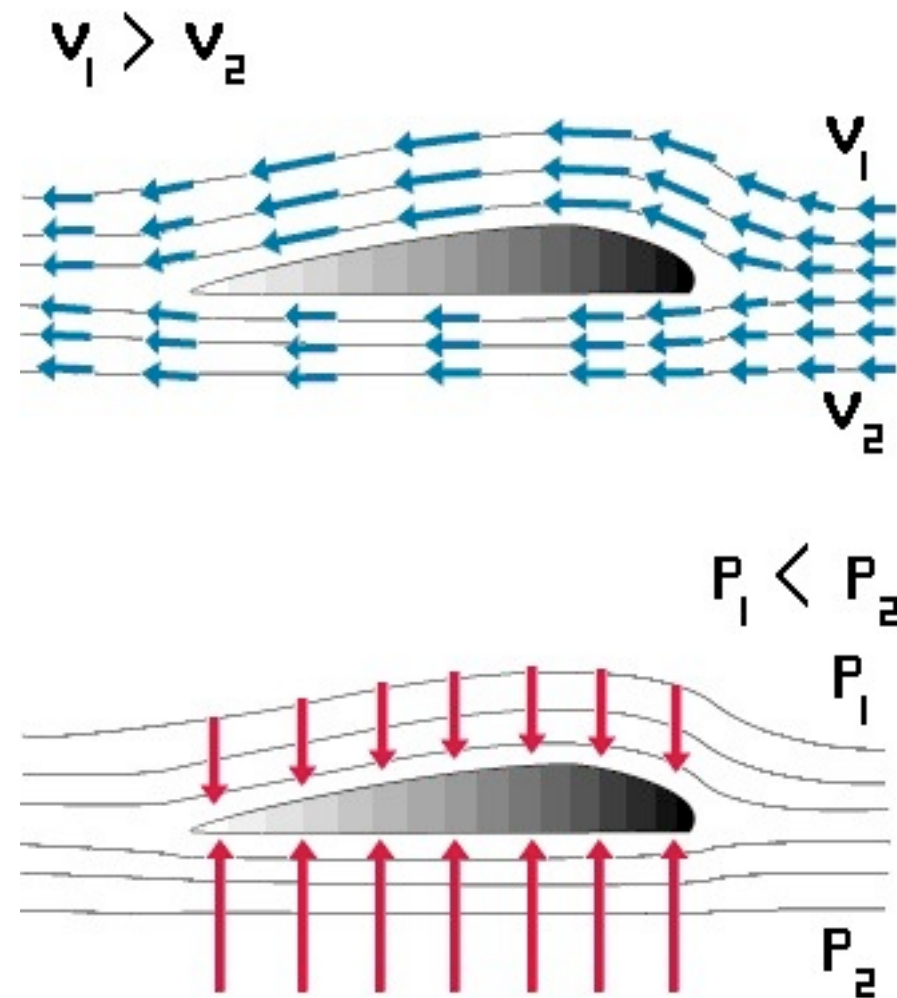
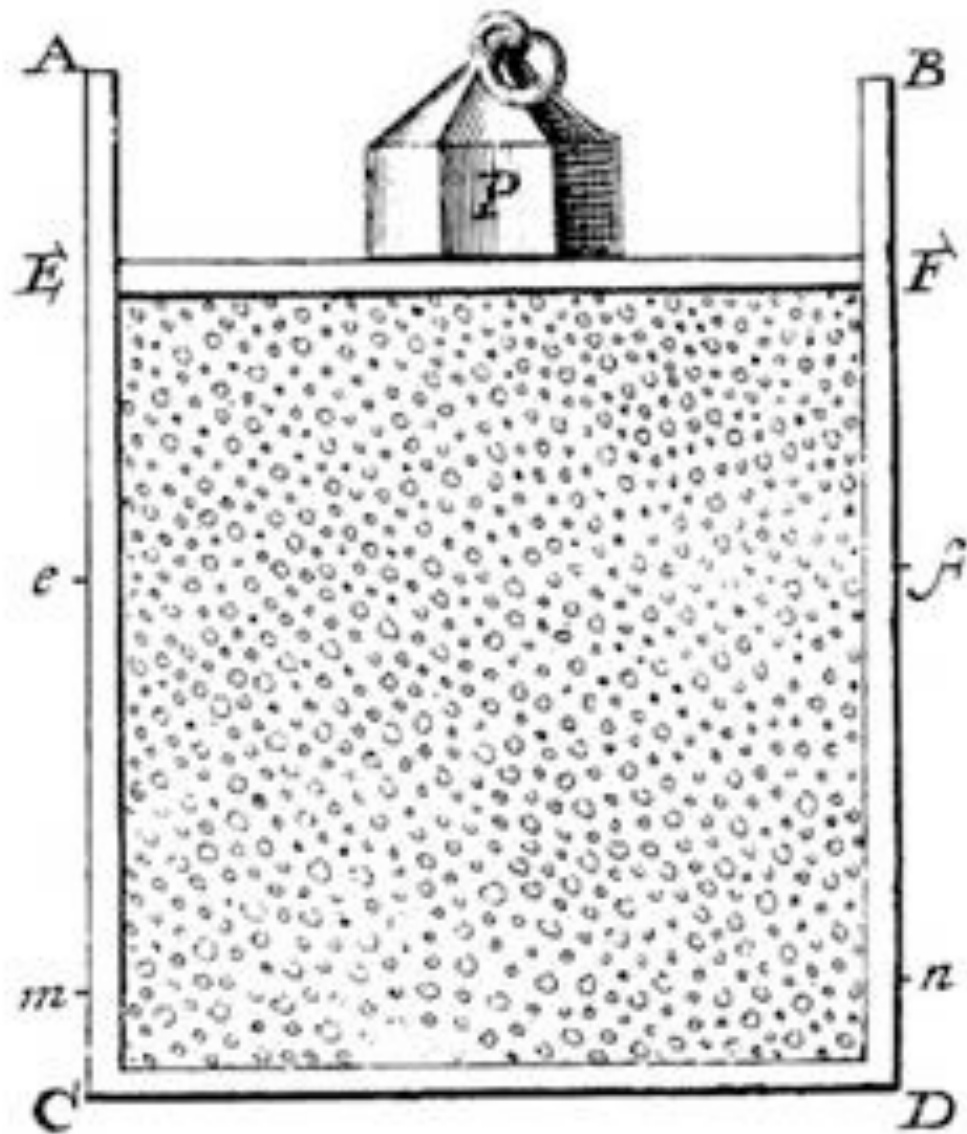


fraction of gas = 81.67%
most probable speed (red) = 336.2 m/s
average speed (orange) = 379.3 m/s
root mean square speed = 411.7 m/s

probability distribution function



Pressão (Teoria Cinética dos Gases)



$$R = 8.31 \text{ J/mol-K}$$

T é a temperatura em K

$$P = nRT$$

$n = N/V$, N é o número total de moléculas

$R = N_A k_B$, N_A é o número Avogadro, 6.02×10^{23}

k_B é a constante de Boltzmann, 1.381×10^{-23}

Pressão (Corpo)

Table 7.1. Typical (gauge) pressures in the body (in mmHg). (Using data from [345])

Até agora falamos de pressão absoluta, no corpo o mais comum é utilizar pressão relativa a pressão atmosférica

arterial blood pressure	
maximum (systolic)	100–140
minimum (diastolic)	60–90
capillary blood pressure	
arterial end	30
venous end	10
venous blood pressure	
typical	3–7
great veins	<1
middle ear pressure	
typical	<1
eardrum rupture threshold	120
eye pressure	
humors	20 (12–23)
glaucoma threshold range	~21–30
cerebrospinal fluid pressure	
in brain – lying down	5–12
gastrointestinal	10–12
skeleton	
long leg bones, standing	~7,600 (10 atm.)
urinary bladder pressure	
voiding pressure	15–30 (20–40 cmH ₂ O)
momentary, up to	120 (150 cmH ₂ O)
intrathoracic	
between lung and chest wall	–10

[Physics of the Human Body - Herman]

Pressão (Corpo)

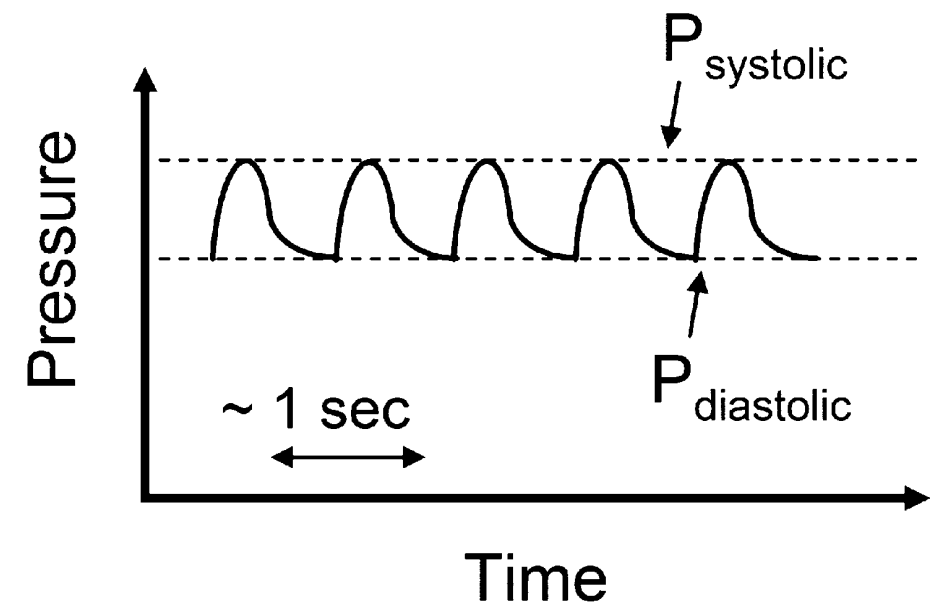
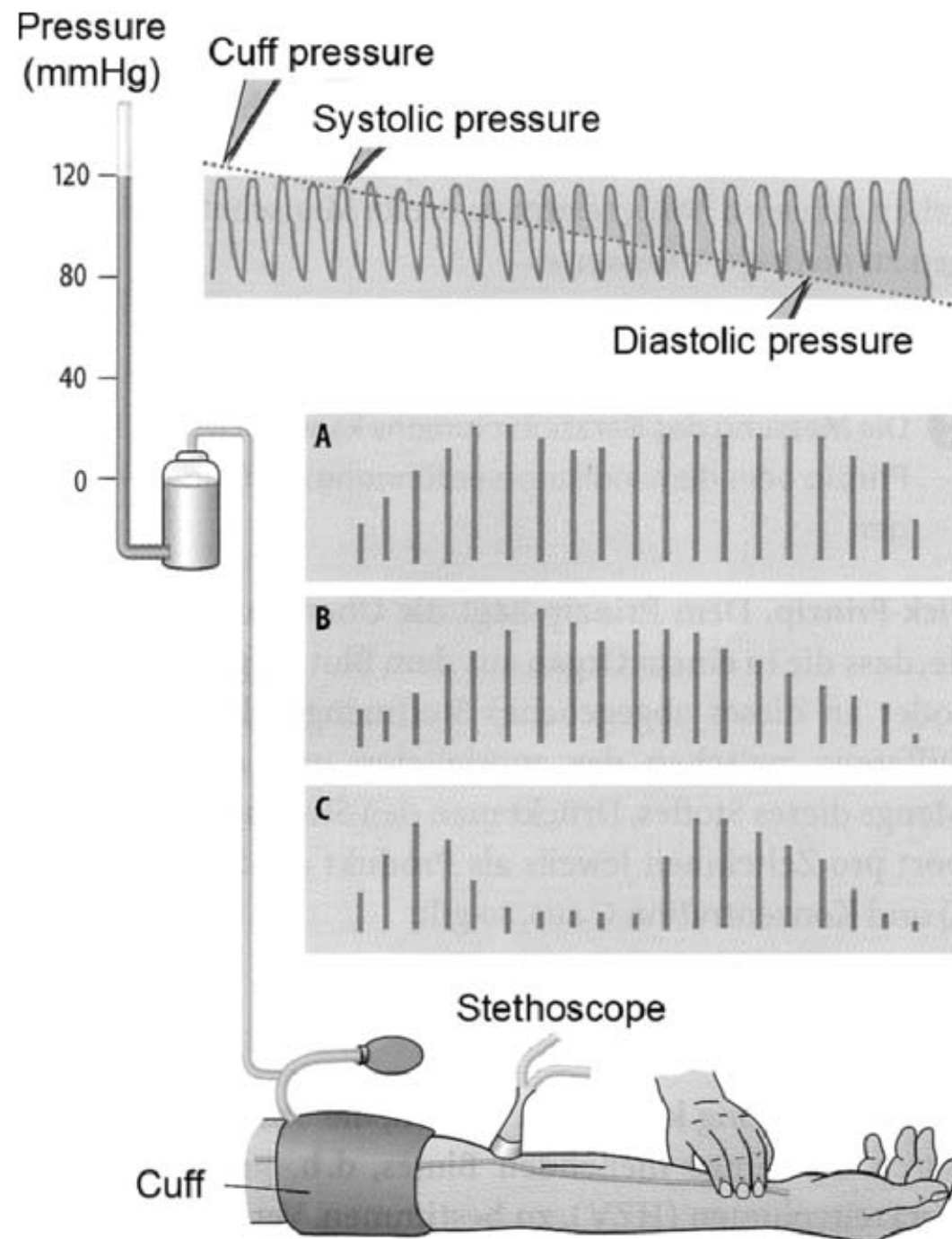


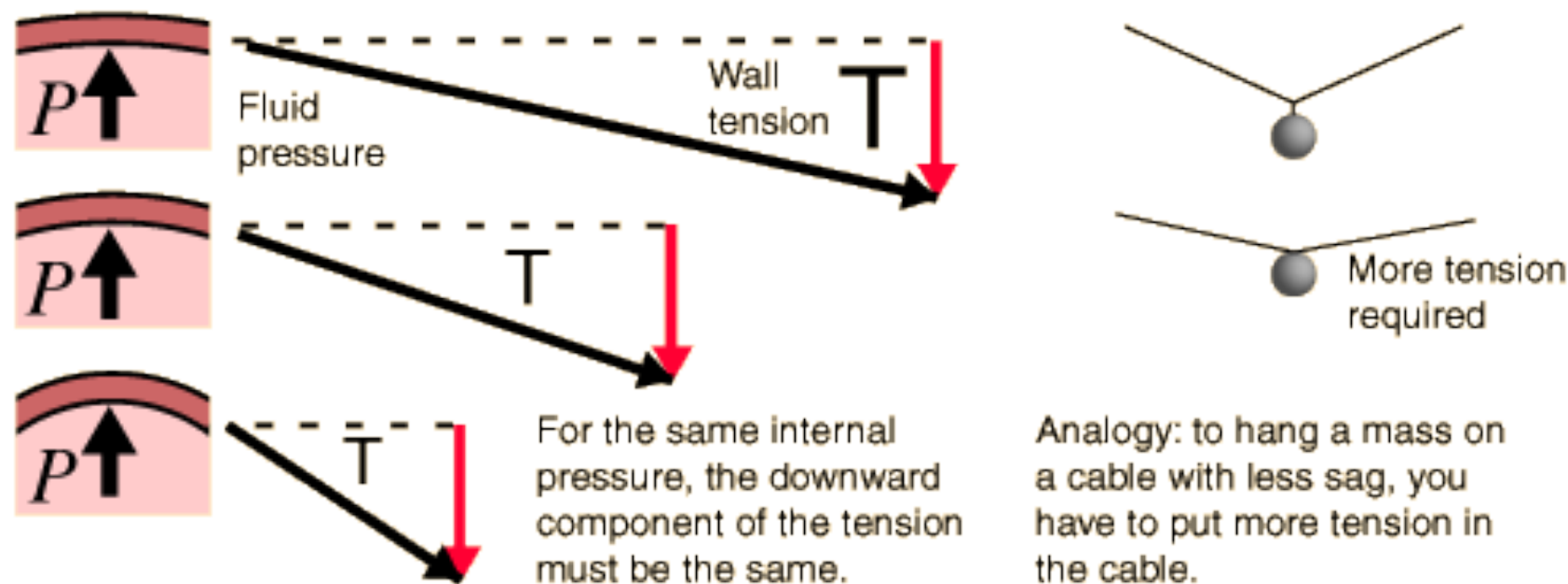
Fig. 7.2. Measuring blood pressure with a sphygmomanometer, listening to Korotkoff sounds (of varying levels during the turbulent flow shown in **A–C**). (Listening to sounds is called *auscultation*). (From [364])

Lei de Laplace

A pressão, P , de um vaso sangüíneo excede a pressão externa por:

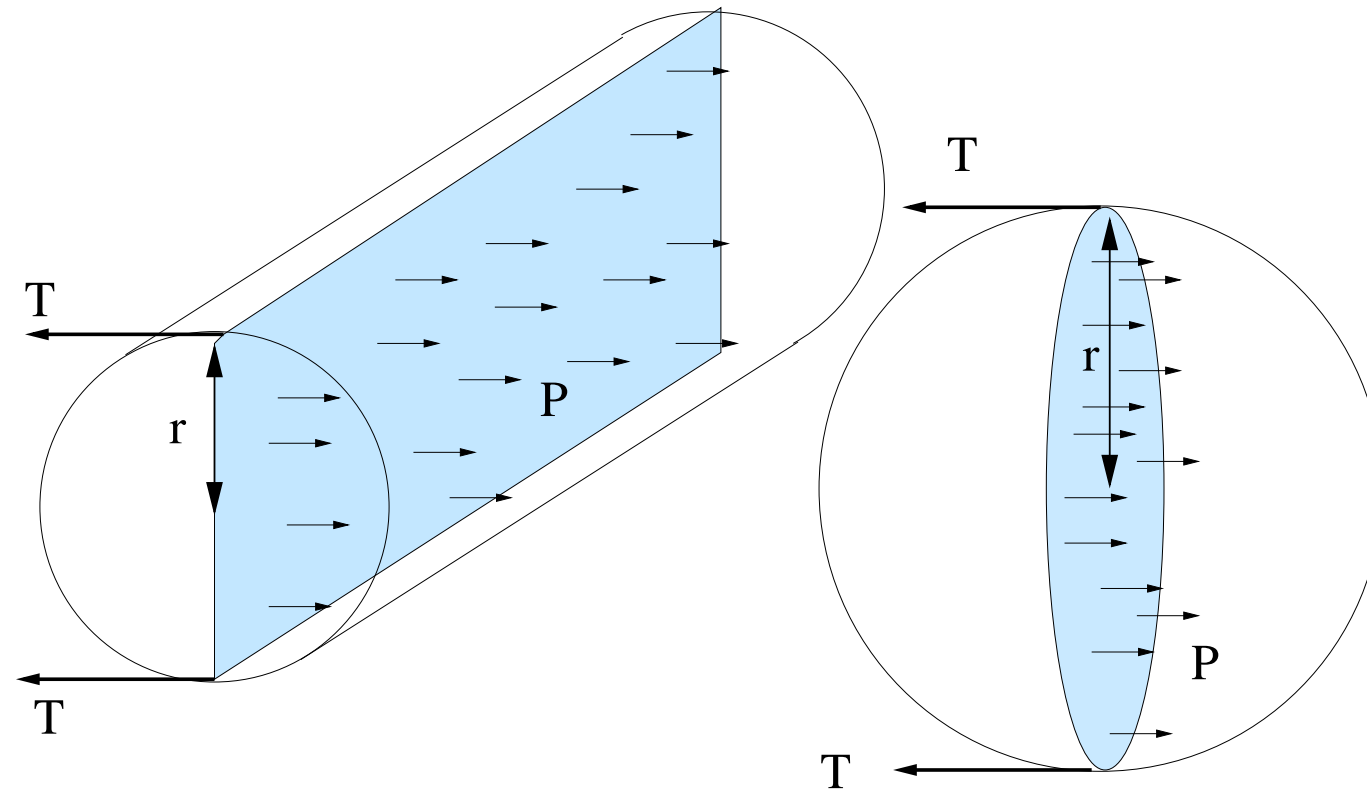
$$\Delta P = P - P_{\text{ext}}$$

essa diferença de pressão deve ser suportada pelas paredes dos vasos. Quanto maior o vaso, maior a tensão nas paredes.



Lei de Laplace

Vasos de raio maiores, necessitam de tensões maiores para suportar uma mesma pressão interna.



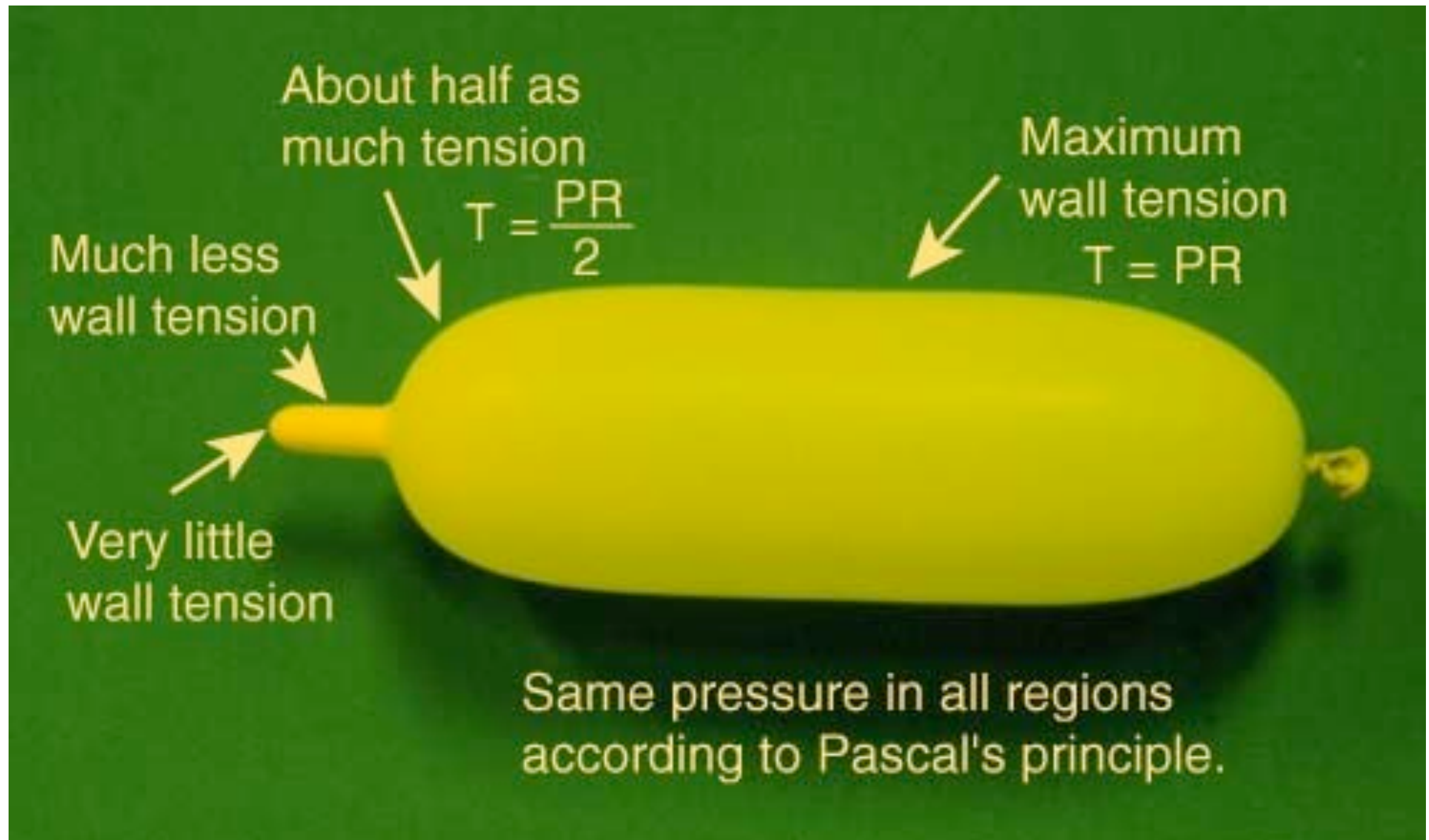
Para vasos cilíndricos:

$$(2rh)P = (2h)T \rightarrow T = Pr$$

Para vasos esféricos:

$$(\pi r^2)P = (2\pi r)T \rightarrow T = Pr/2$$

Lei de Laplace



Fluidos em Movimento

5 atributos, o Fluxo pode ser:

- **laminar ou turbulento**. O numero de Reynolds, Re , é um variável adimensional que divide esses dois regimes.
- **compressivo** (gases) **ou incompressivo** (liquidos)
- **viscoso ou não viscoso** (superfluidos)
- **rotacional** (vortices) **ou irrotacional**
- **constante ou pulsátil**

Reynolds: Razão entre as forças inerciais e as viscosas

↓
($\rho u^2 / 2$; ρu^2 is used here)
($\rho \eta u / d$)

$$Re = \frac{\rho u^2}{\rho \eta u / d} = \frac{\rho u d}{\eta} = \frac{u d}{v},$$

where $v = \eta / \rho$ is the coefficient of *kinematic viscosity*.

Geralmente, para um fluido em um tubo, $Re < 2000$ o fluxo é laminar e para $Re > 2000$ turbulento

Fluidos em Movimento

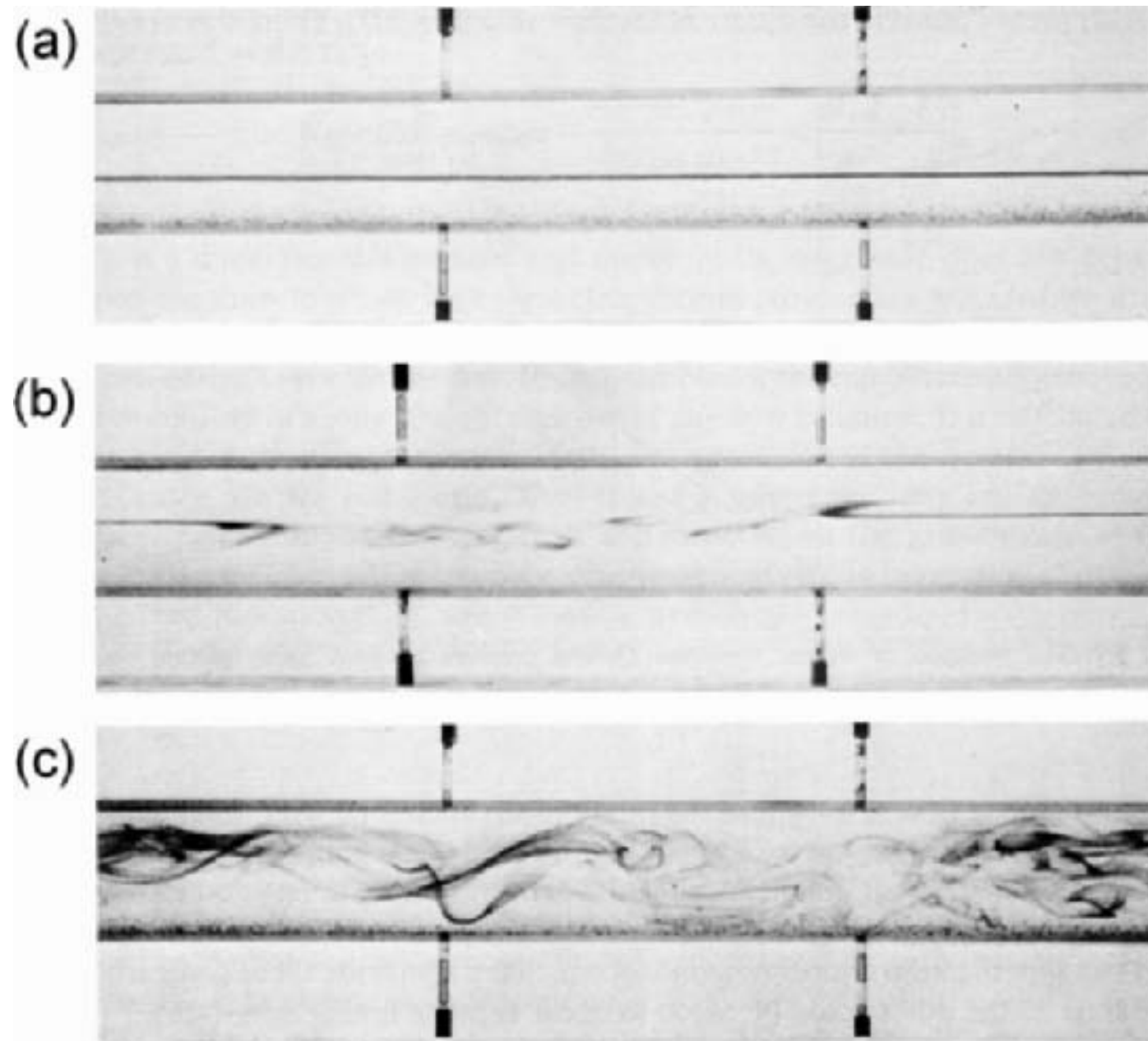


Fig. 7.5. Motion of a filament of dye in a straight pipe, showing (a) steady, laminar flow at low Re , (b) short bursts of turbulence for Re above the critical value, and (c) fully turbulent flow with random motion of the dye streak for higher Re . (From [346]. Used with permission of Oxford University Press)

Lei da Continuidade

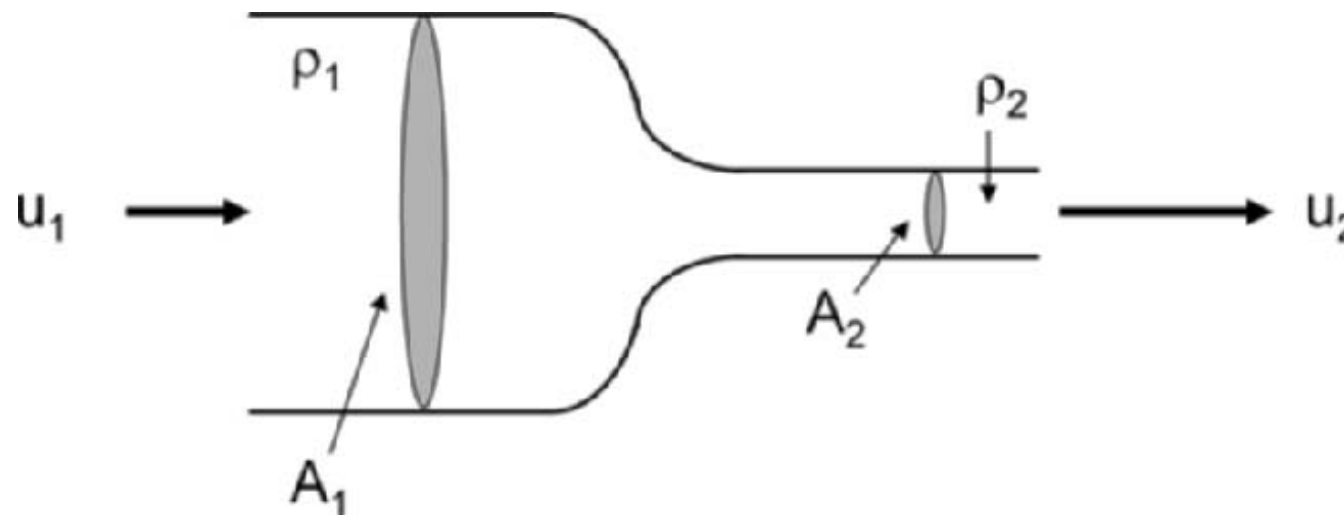


Fig. 7.6. Continuity of flow when the tube cross-sectional area changes

Área x Distância = Volume, consequentemente Au é o fluxo de volume por unidade de tempo e o fluxo de massa por unidade de tempo pode ser escrita como:

$$\rho_1 A_1 u_1 = \rho_2 A_2 u_2.$$

Para o fluxo:

$$Q = A_1 u_1 = A_2 u_2.$$

Princípio de Bernoulli

A Equação de Bernoulli relaciona a média da velocidade do fluxo u , pressão P , e altura y para um fluido incompressível, não viscoso, laminar e irrotacional. Em qualquer dois pontos:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho u_1^2 + \rho g y_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho u_2^2 + \rho g y_2.$$

Existem 3 casos especiais: (1) quando o fluxo $u = 0$; (2) quando a pressão $P_1 = P_2$, reduzindo ao teorema de Torricelli; e (3) quando altura $y_1 = y_2$, reduzindo o problema para um fluxo de Venturi

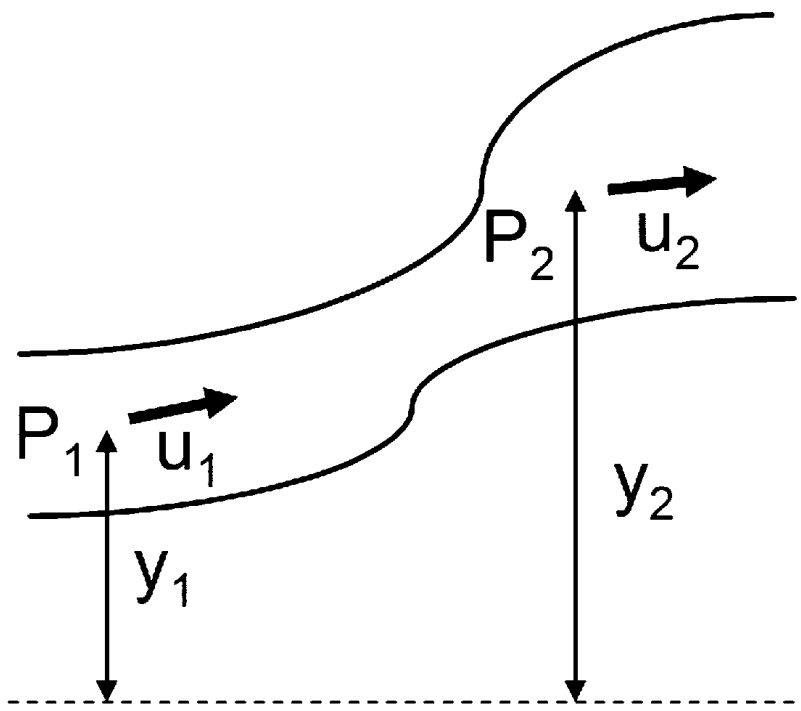


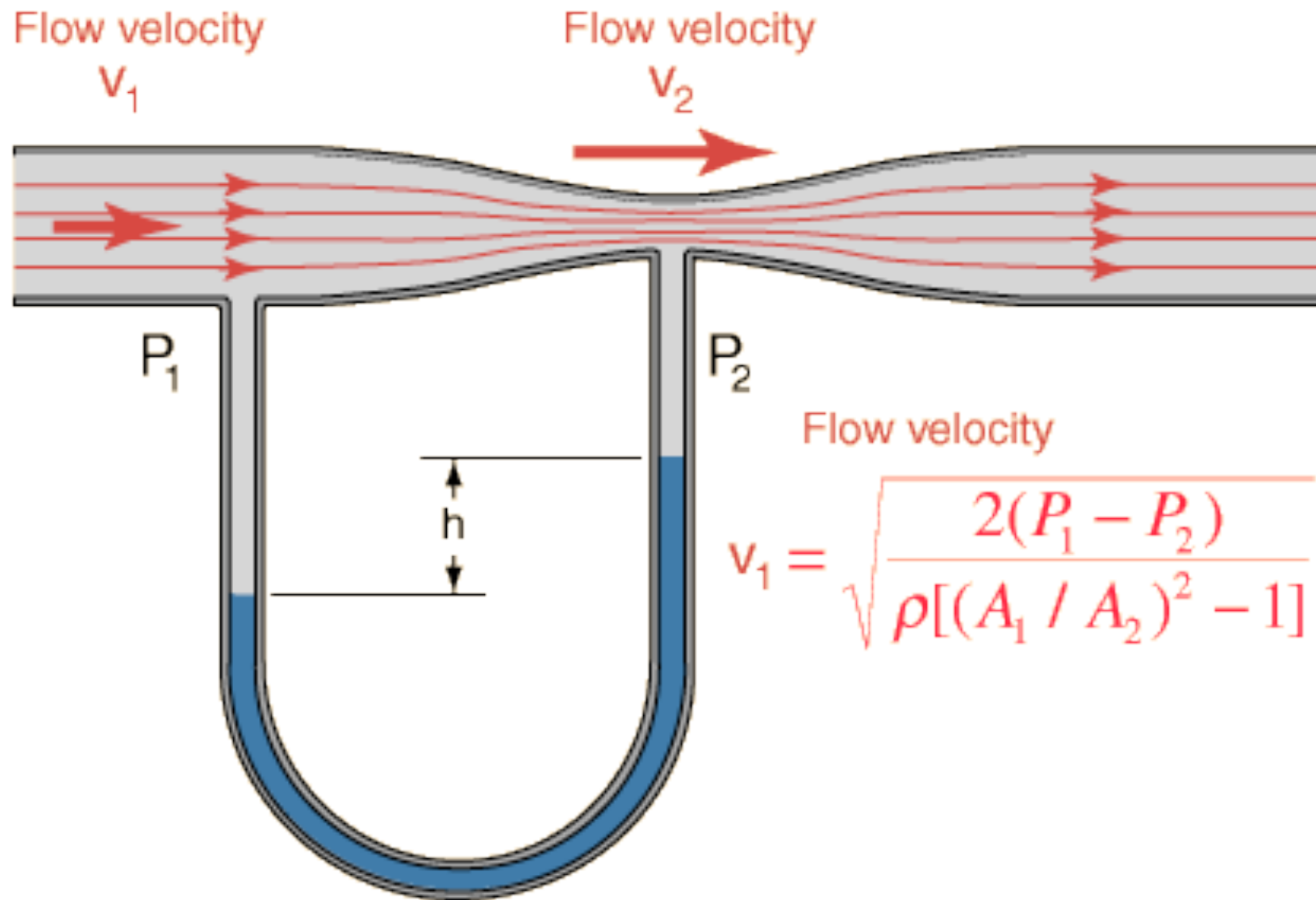
Fig. 7.7. For irrotational and nonviscous flow, the pressure, flow speed, and height are related by Bernoulli's equation along any streamline

$$P_1 + \rho g y_1 = P_2 + \rho g y_2 \quad (1)$$

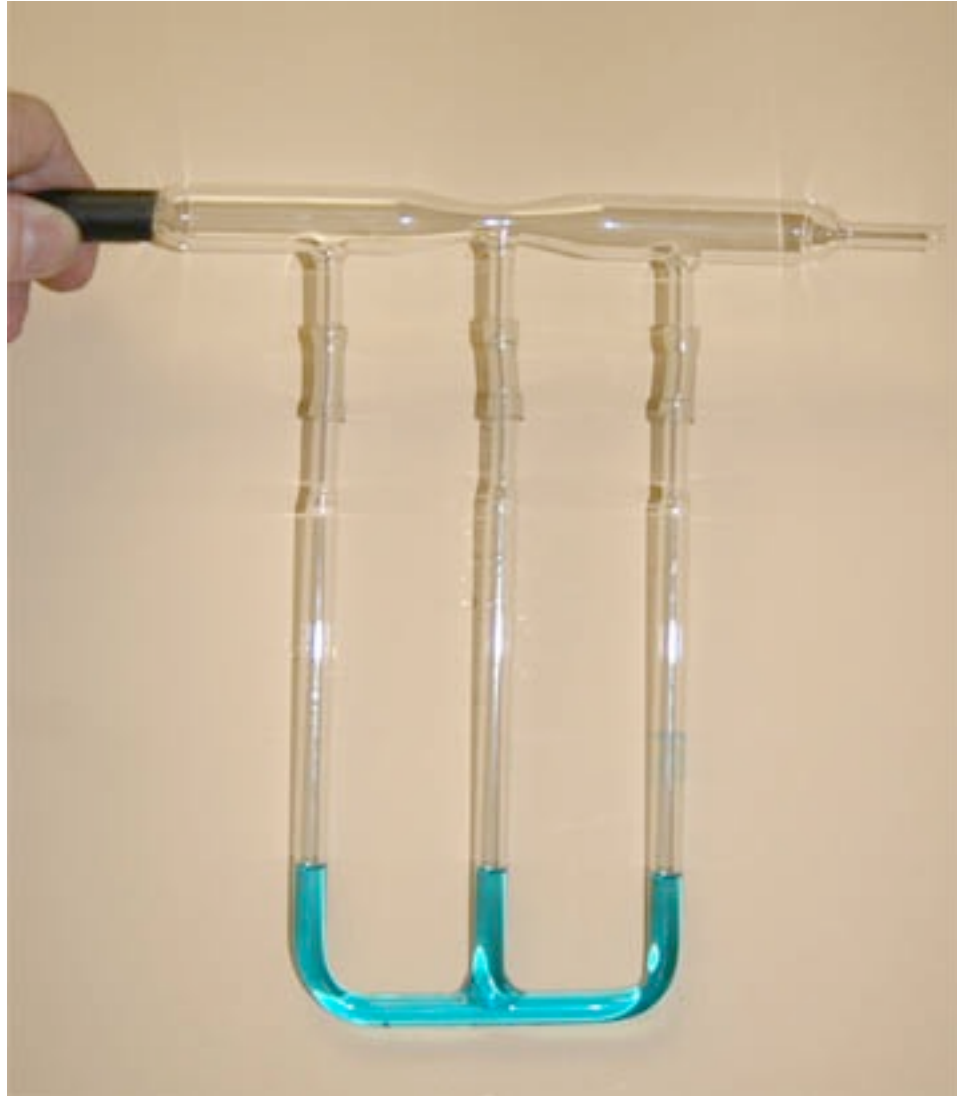
$$\rho u_1^2/2 + \rho g y_1 = \rho u_2^2/2 + \rho g y_2 \quad (2)$$

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho u_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho u_2^2. \quad (3)$$

Venturi



Venturi



Interação entre os parâmetros de fluxo

Pressão P , volume V , e taxa de fluxo Q estão relacionadas nos fluxos nos vasos ou nas vias aéreas.

Resistência:

$$R_{\text{flow}} = \frac{\Delta P}{Q}.$$












Complacência:

$$C_{\text{flow}} = \frac{\Delta V}{\Delta P}.$$

Inertância:

$$L_{\text{flow}} = \frac{\Delta P}{\Delta Q}.$$

Análogos

Position, volume, charge	Position, x (m)	Volume, V (m^3 , cm^3)	Charge, q (coulomb)	Volume, V or X (m^3)
Current flow	Speed, v (m/s)	Volume flow, Q (m^3/s , cm^3/s)	Current, I (amp)	Volume current, dX/dt or U (m^3/s)
Driving force	Force, F (N)	Pressure, P (N/m^2)	Voltage, V (volt)	Pressure, P (N/m^2)
Resistance	 Mechanical resistance, Γ_{mech} (or dashpot, c , $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}$, as shown)	 Viscosity (in shown dashpot, η , $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$)	 Electrical resistance, R_{elect} (ohm)	 Acoustic resistance, R_{acoust} (acoustical ohm, $\text{kg}/\text{m}^4\cdot\text{s}^2$)
Inductance, Mass, Inertance	 Mass, M (kg)	 Mass, M (kg) (and mass density)	 Inductance, L (henry)	 Inertance, M_{acoust} (kg/m^4)
Capacitance, Compliance	 Compliance, C_{mech} (spring, k , N/m)	-	 Electrical capacitance, C_{elect} (farad)	 Acoustic capacitance, C_{acoust} (kg^5/N)
	(a) Mechanical	(b) Fluid Flow	(c) Electrical	(d) Acoustical

Análogos

Table D.1. Analog of blood flow and electrical circuits (with units)

blood circulation parameter	electrical parameter
volume, V_{flow} (m^3)	charge, q (C, coulomb)
blood flow rate, Q (m^3/s)	current, I (A, ampere)
pressure, ΔP (N/m^2)	voltage, V_{elect} (V, volt)
vascular resistance, R_{flow} ($\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^5$)	resistance, R_{elect} (Ω , ohm)
inertance, L_{flow} (kg/m^4)	inductance, L_{elect} (H, henry)
compliance, C_{flow} ($\text{m}^5/\text{N}\cdot\text{s}$)	capacitance, C_{elect} (F, farad)

Fluidos Viscosos

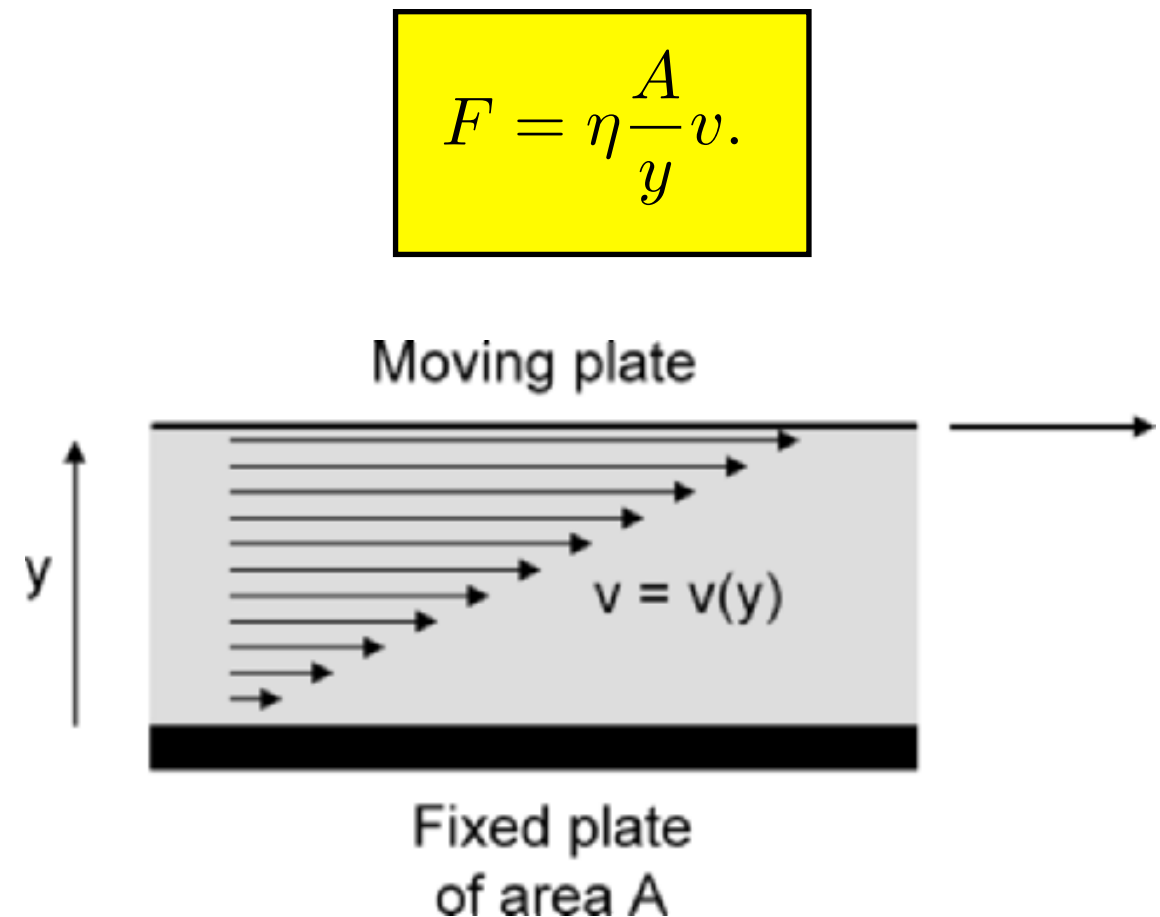
$$P_1 + \frac{1}{2}\rho u_1^2 + \rho g y_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho u_2^2 + \rho g y_2.$$

$$Q = A_1 u_1 = A_2 u_2.$$

A Equação de Bernoulli prevê que a pressão não muda durante o fluxo se a área da seção transversal e a altura não mudar

Isso é verdade para um fluido ideal não viscoso.

- Viscosidade é o atrito/fricção durante o fluxo.
- Viscosidade causa uma queda na pressão durante o fluxo.
- O coeficiente de viscosidade η , surge como uma constante de proporcionalidade entre a força tangencial (shear force) necessária para mover uma camada de fluido de área A , a uma velocidade constante v , na direção x , quando a camada está a uma distância y de uma outra placa estacionária



Fluidos Viscosos

$$F = \eta \frac{A}{y} v.$$

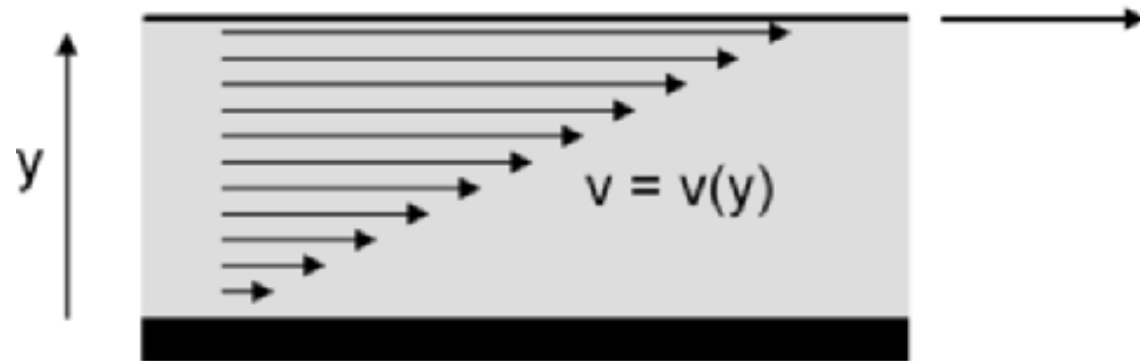
$$\tau = F/A$$

Shear Stress

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy},$$

dv/dy is called the *shear rate*.

Moving plate



Fixed plate
of area A

Fluidos caracterizados por
essas equações são ditos
Newtonianos

Por causa dessa resistência deve existir um gradiente de pressão para manter esse fluxo. A relação entre essa queda de pressão e a taxa de fluxo volumétrico Q é dada pela Lei de

Poiseuille

$$\Delta P = \frac{8\eta L}{\pi R^4} Q.$$

Que pode ser visto como a queda de pressão quando existe um fluxo em um tubo

Fluidos Viscosos

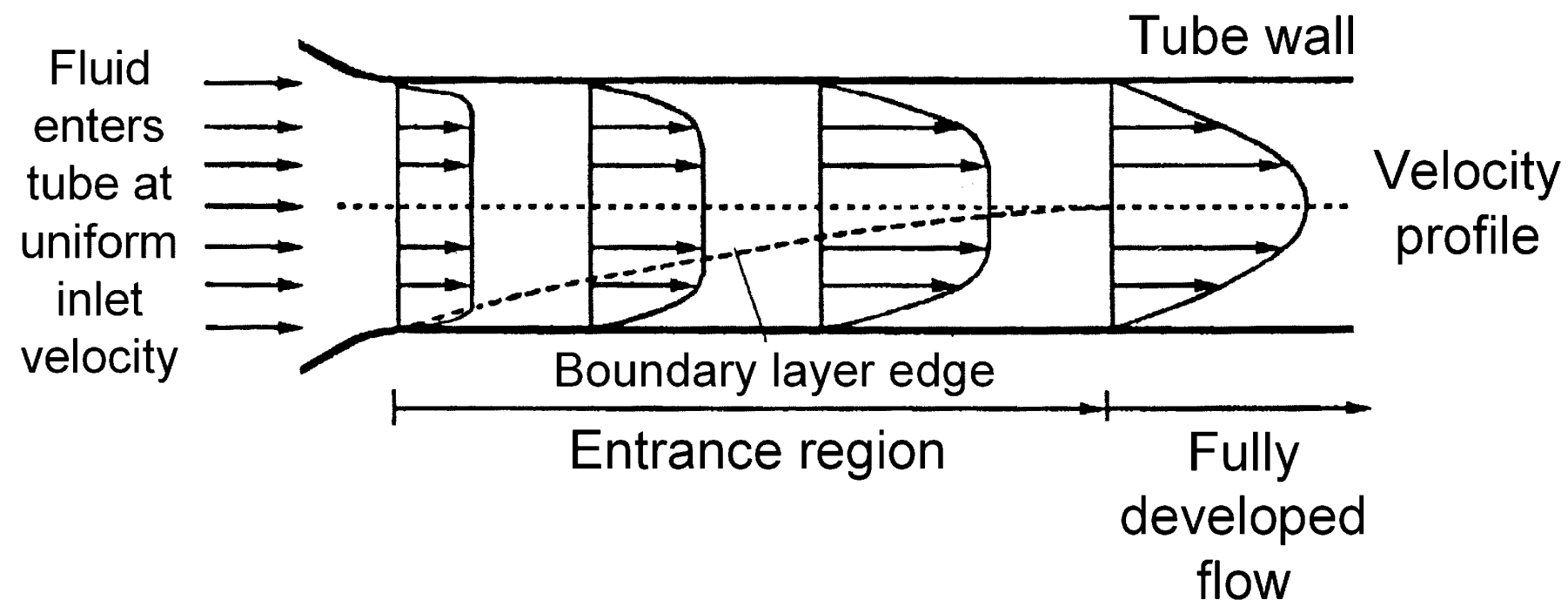


Fig. 7.11. Establishment of steady-state Newtonian flow into the parabolic velocity profile (in the fully developed flow). (From [351], based on [355]. Courtesy of Robert A. Freitas Jr., Nanomedicine, Vol. 1 (1999), <http://www.nanomedicine.com>)

Fluidos Viscosos

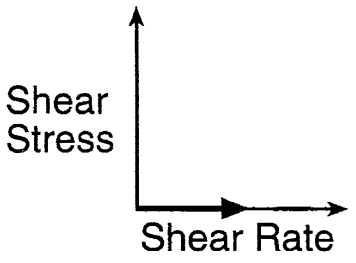
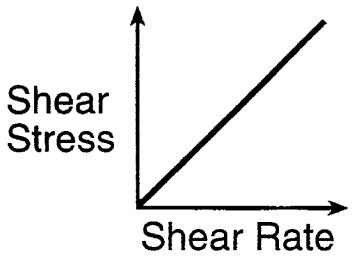
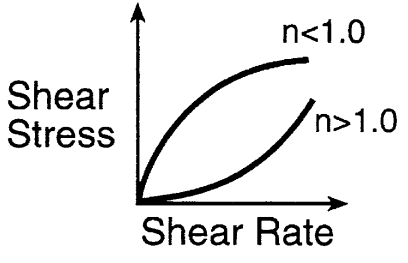
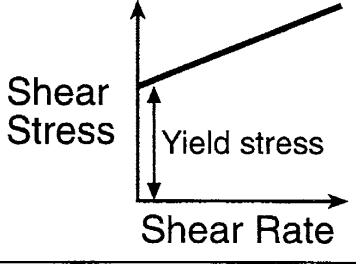
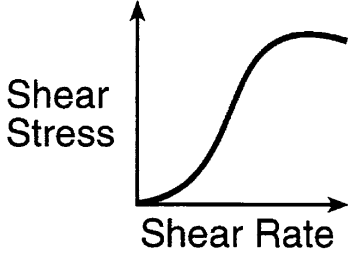
FLUID	SHEAR STRESS	PHYSICAL BEHAVIOR
Ideal	$\tau = 0$	
Newtonian	$\tau = \eta \frac{dv}{dy}$	
Non-Newtonian	$\tau = \eta \left(\frac{dv}{dy} \right)^n$	
Ideal Plastic	$\tau = \tau_y + \eta \left(\frac{dv}{dy} \right)$	
Viscoelastic	$\tau + \left(\frac{\mu}{\lambda} \right) \dot{\tau} = \eta \left(\frac{dv}{dy} \right)$	
τ_y = yield stress η = coefficient of viscosity		λ = rigidity modulus n = constant

Fig. 7.12. Newtonian and non-Newtonian fluid flow (From [357])

Viscosidade

material	T (°C)	η
water	0	1.78×10^{-3}
	20	1.00×10^{-3}
	37	0.69×10^{-3}
	50	0.55×10^{-3}
	100	0.28×10^{-3}
blood plasma	37	1.5×10^{-3}
whole blood ^a	37	$\sim 4.0 \times 10^{-3}$
low shear rate, Hct = 45%		$\sim 100 \times 10^{-3}$
low shear rate, Hct = 90%		$\sim 1,000 \times 10^{-3}$
high shear rate, Hct = 45%		$\sim 10 \times 10^{-3}$
low shear rate, Hct = 90%		$\sim 100 \times 10^{-3}$
cerebrospinal fluid	20	1.02×10^{-3}
interstitial fluid	37	$1.0\text{--}1.1 \times 10^{-3}$
human tears	37	$0.73\text{--}0.97 \times 10^{-3}$
synovial fluid ^b	20	>0.3
castor oil	20	1
motor oil, SAE 10	20	0.065
motor oil, SAE 50	20	0.54
machine oil, heavy	37	0.13
machine oil, light	37	0.035
ethylene glycol	37	0.011
mercury, liquid	37	1.465×10^{-3}
methanol	37	0.47×10^{-3}
ketchup	20	50
peanut butter	20	250
glass (anneal)	720–920 K	2.5×10^{12}
(blowing)	$\sim 1,300$ K	$\sim 1 \times 10^6$
(furnace)	1,500–1,700 K	$\sim 1 \times 10^2$
air	20	1.8×10^{-5}
	100	2.1×10^{-5}

**Hct - *hematocrit* é
a fração de células
vermelhas no
sangue**

Modelo de velocidade

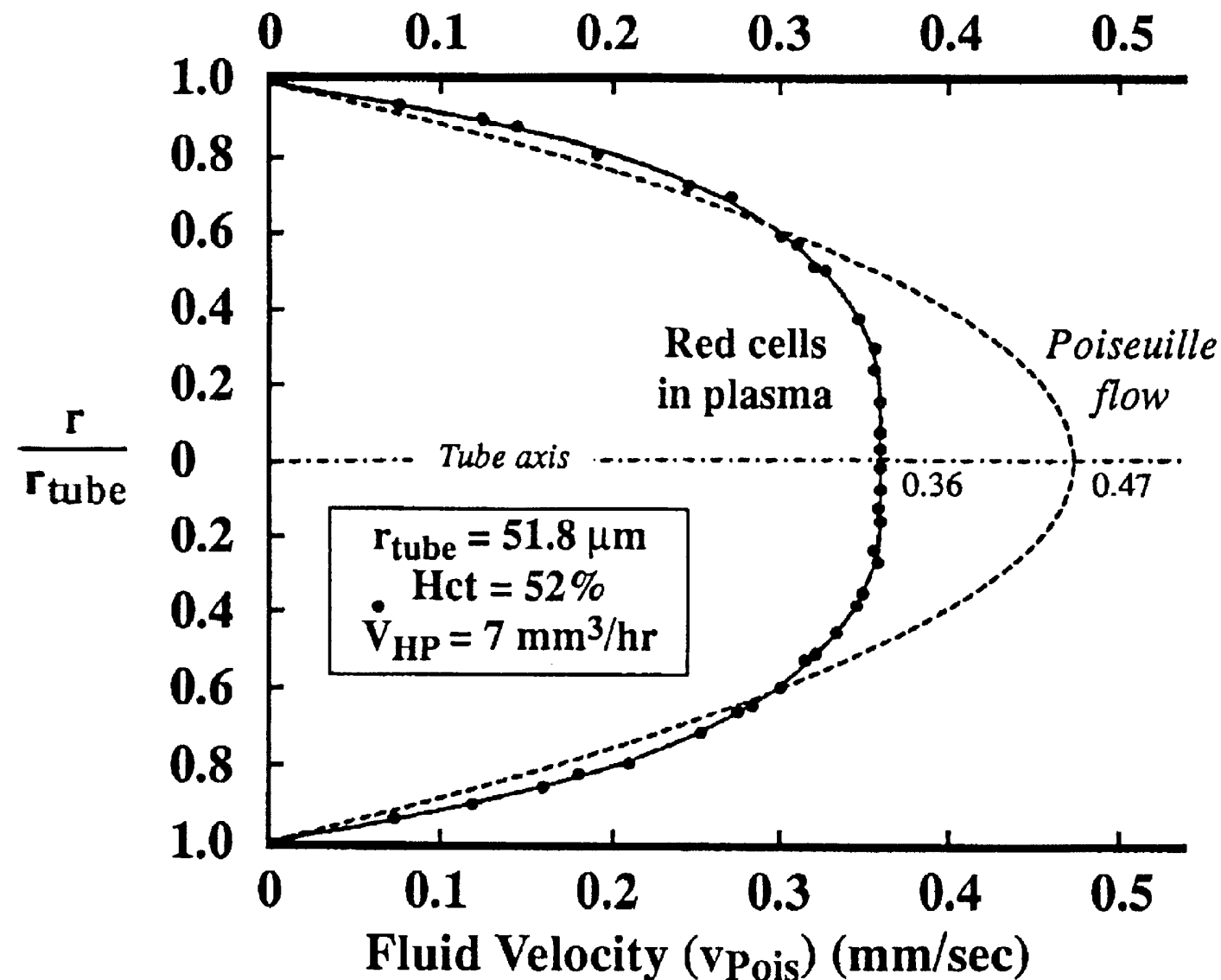


Fig. 7.13. Velocity flow profile of whole blood is blunted relative to the ideal parabolic flow of a Newtonian fluid. (From [351], based on [355]. Courtesy of Robert A. Freitas Jr., Nanomedicine, Vol. 1 (1999), <http://www.nanomedicine.com>)

Difusão

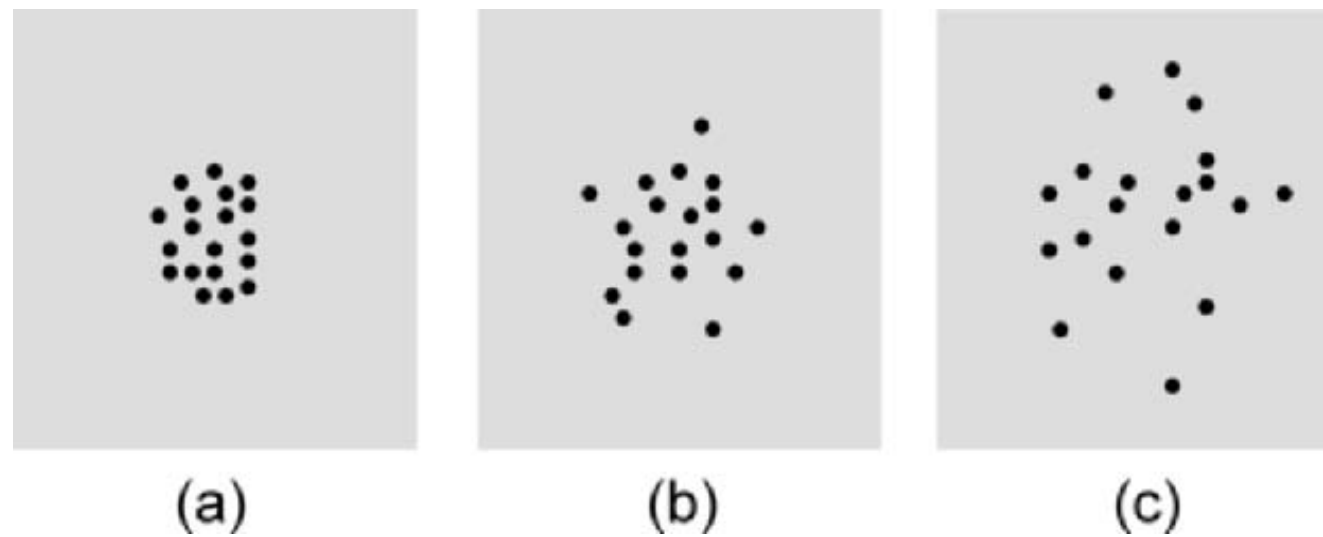
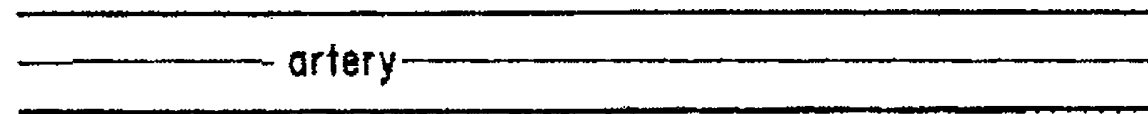


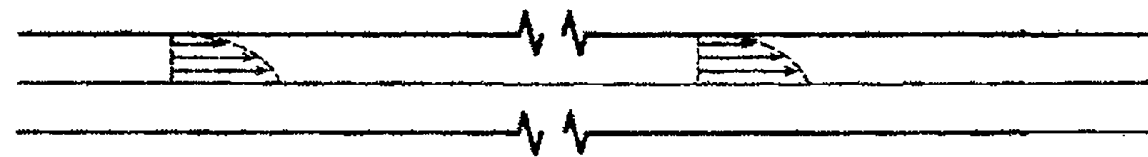
Fig. 7.17. Schematic of how the locations of particles vary at successively later times, from (a) to (c), as a result of diffusion

Difusão

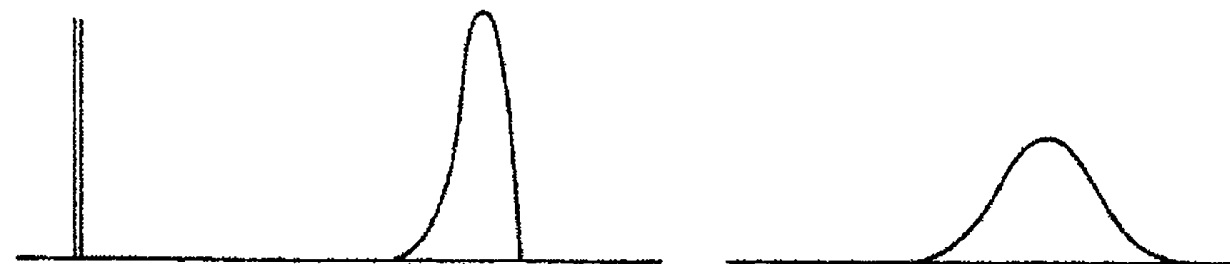
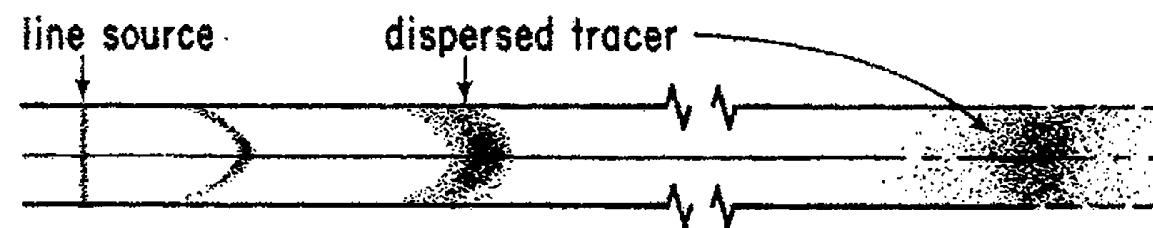
MODEL



VELOCITY PROFILE

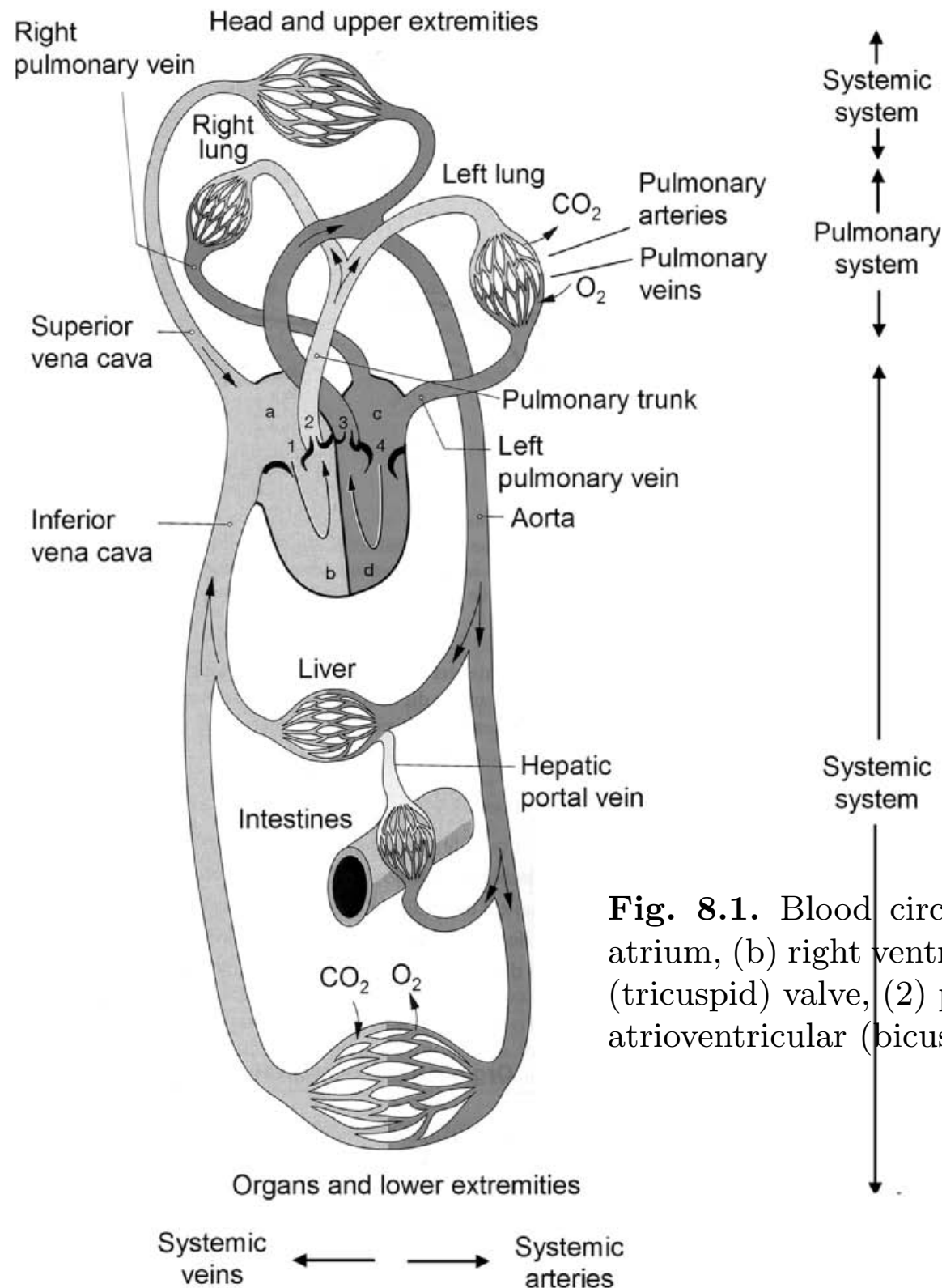


TRACER PROFILE



CONCENTRATION PROFILE

Sistema Circulatório



- O fluxo de sangue do coração possui dois sistemas distintos: a circulação pulmonar (CP) e a circulação sistêmica (CS).
- O fluxo de sangue Q nos dois é o mesmo
- Na CP o sangue dispensa CO₂ e pega O₂, na CS ocorre o oposto

Fig. 8.1. Blood circulation system, and labeled within the heart: the (a) right atrium, (b) right ventricle, (c) left atrium, (d) left ventricle, (1) right atrioventricular (tricuspid) valve, (2) pulmonary semilunar valve, (3) aortic semilunar valve, (4) left atrioventricular (bicuspid, mitral) valve. (From [416])

Sistema Circulatório

Table 8.1. Normal resting values of blood pressure, with system volumes

	P (mmHg)	V (L)
systemic arteries	100	1.0
systemic veins	2	3.5
pulmonary arteries	15	0.1
pulmonary veins	5	0.4

Sistema Circulatório

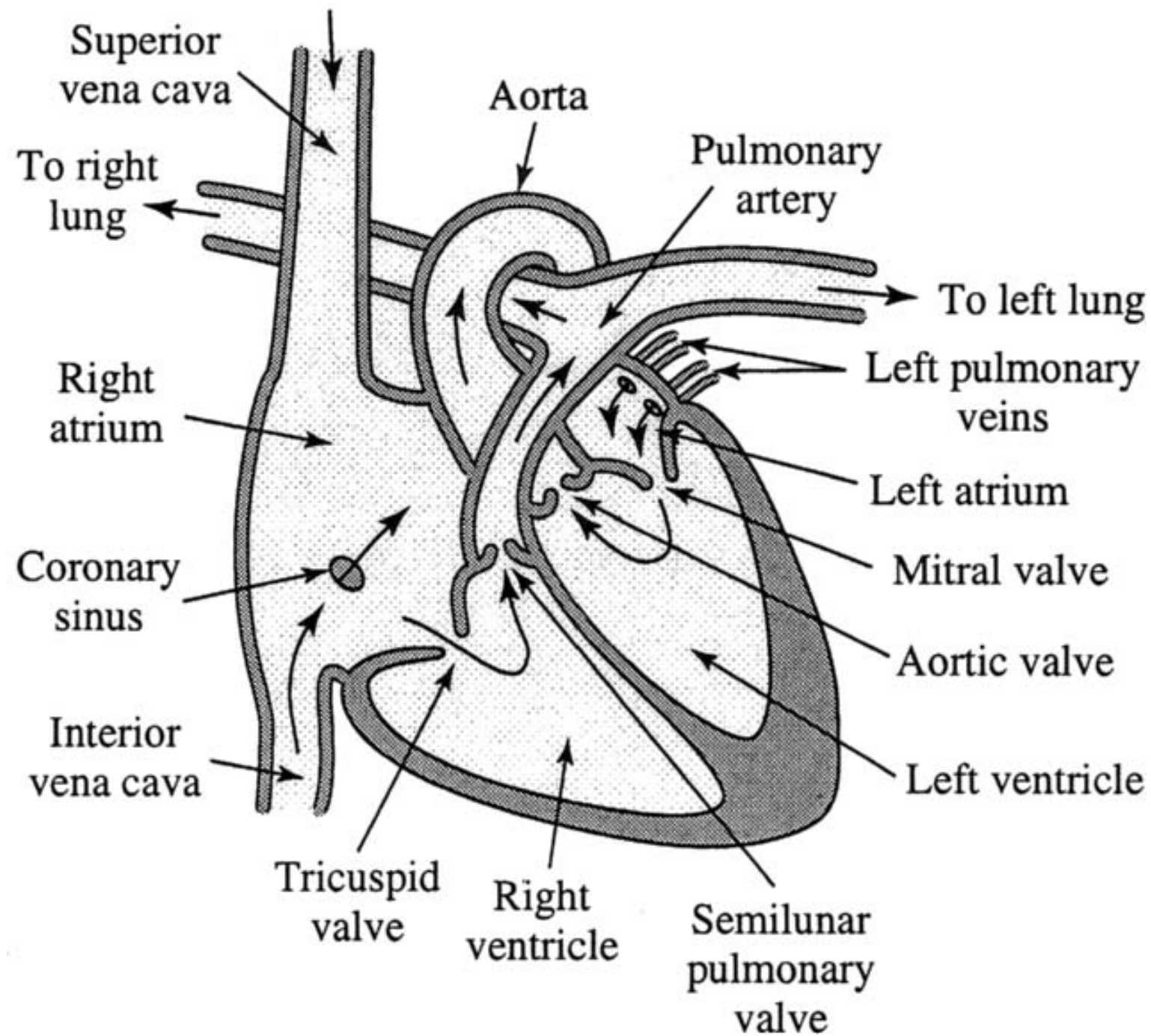
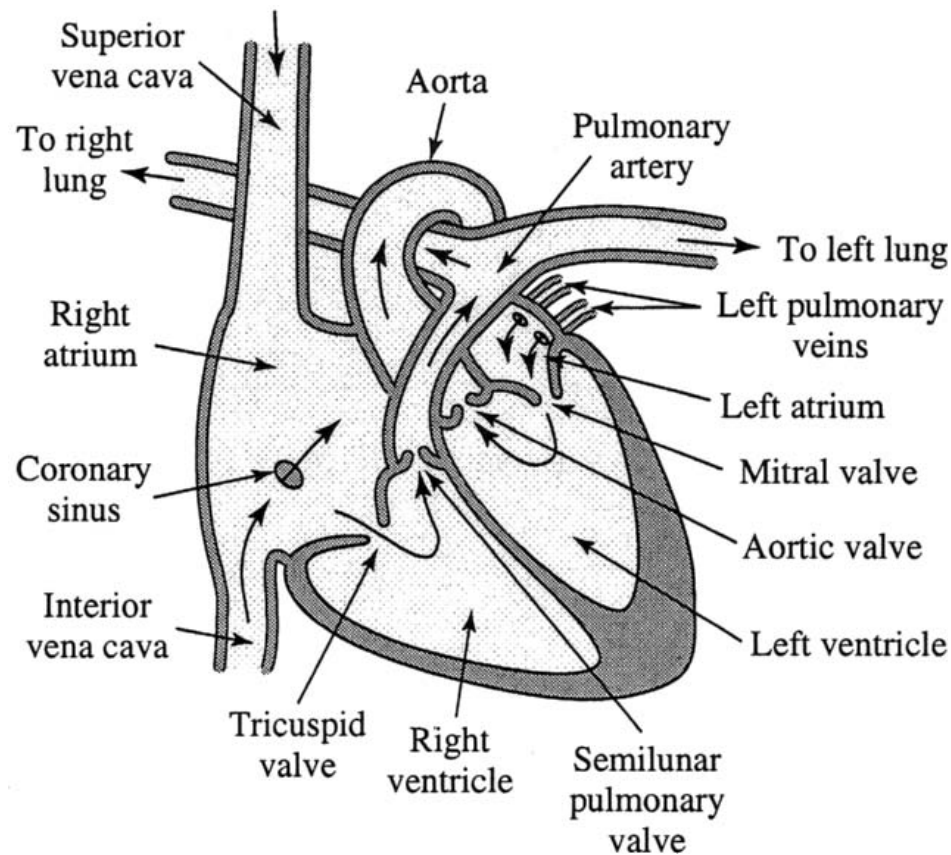


Fig. 8.2. Diagram of the heart, with its principle chambers, valves, and vessels.
(From [367])

Sistema Circulatório



- O sistema circulatório possui estágios bastante controlados:
- O primeiro estágio é a diástole onde as veias enchem ambos os **átrios** do coração, enquanto ambos os ventrículos estão relaxados.
- No segundo estágio, sístole, o músculo cardíacos (miocárdio) do lado direito e do lado esquerdo dos **átrios** contraem, bombeando sangue pelas válvulas atrioventricular respectivamente em ambos os **ventrículos** ao mesmo tempo (todavia ~75% do sangue chega aos ventrículos antes dessa contração).
- No primeiro passo da sístole, ambos os **ventrículos** contraem (isovolumetricamente) ao mesmo tempo, e no segundo passo eles ejetam o sangue na artéria pulmonar e na aorta respectivamente.
- A pressão sistólica ocorre nesse segundo estágio.

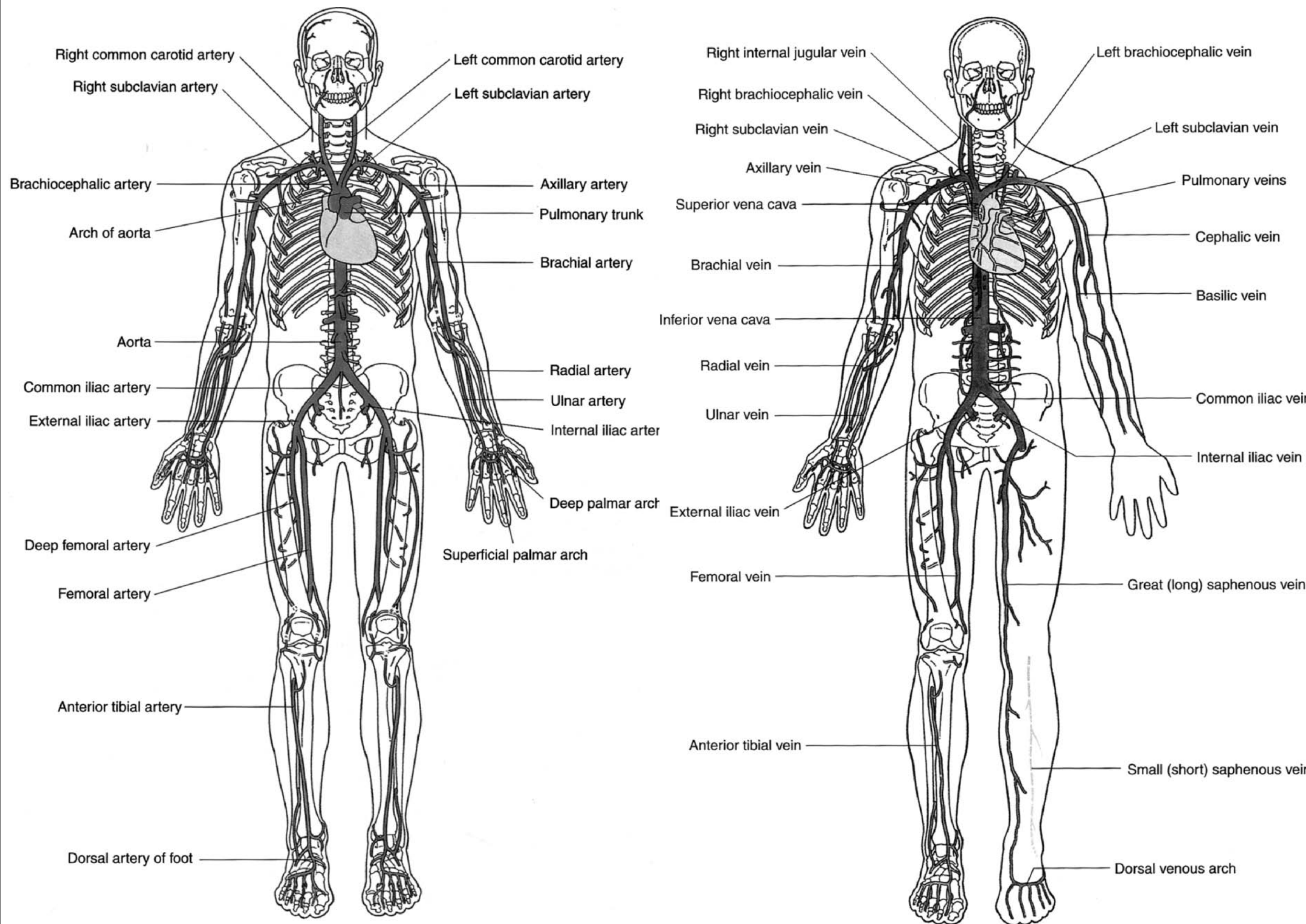


Table 8.2. Approximate quantification of individual vessels in the human circulatory system. (Using data from [382])

vessel	diameter (mm)	length (mm)	wall thickness (μm)	pressure (mmHg)
aorta	25.0	400	1,500	100
large arteries	6.5	200	1,000	100
main artery branches	2.4	100	800	95
terminal artery branches	1.2	10	125	90
arterioles	0.1	2	20	60
capillaries	0.008	1	1	30
venules	0.15	2	2	20
terminal venules	1.5	10	40	15
main venous branches	5.0	100	500	15
large veins	14.0	200	800	10
vena cava ^a	30.0	400	1,200	5
heart chambers	—	—	—	120

This is for a 30-yr-old male, with mass 70 kg and 5.4 L blood volume.

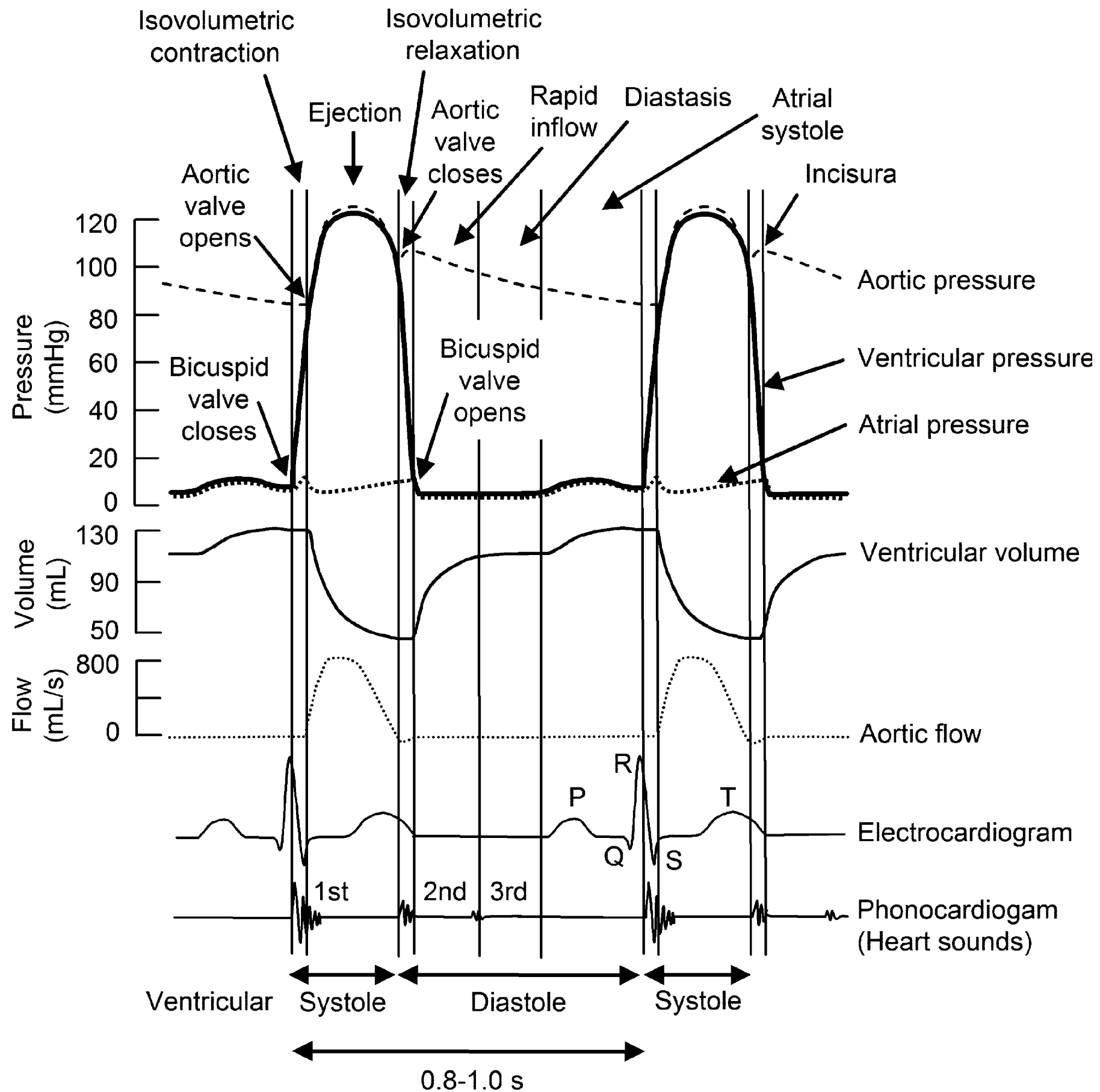
^aThere are really two vena cavae.

Table 8.3. Approximate quantification of total vessel systems in the human circulatory system. (Using data from [382])

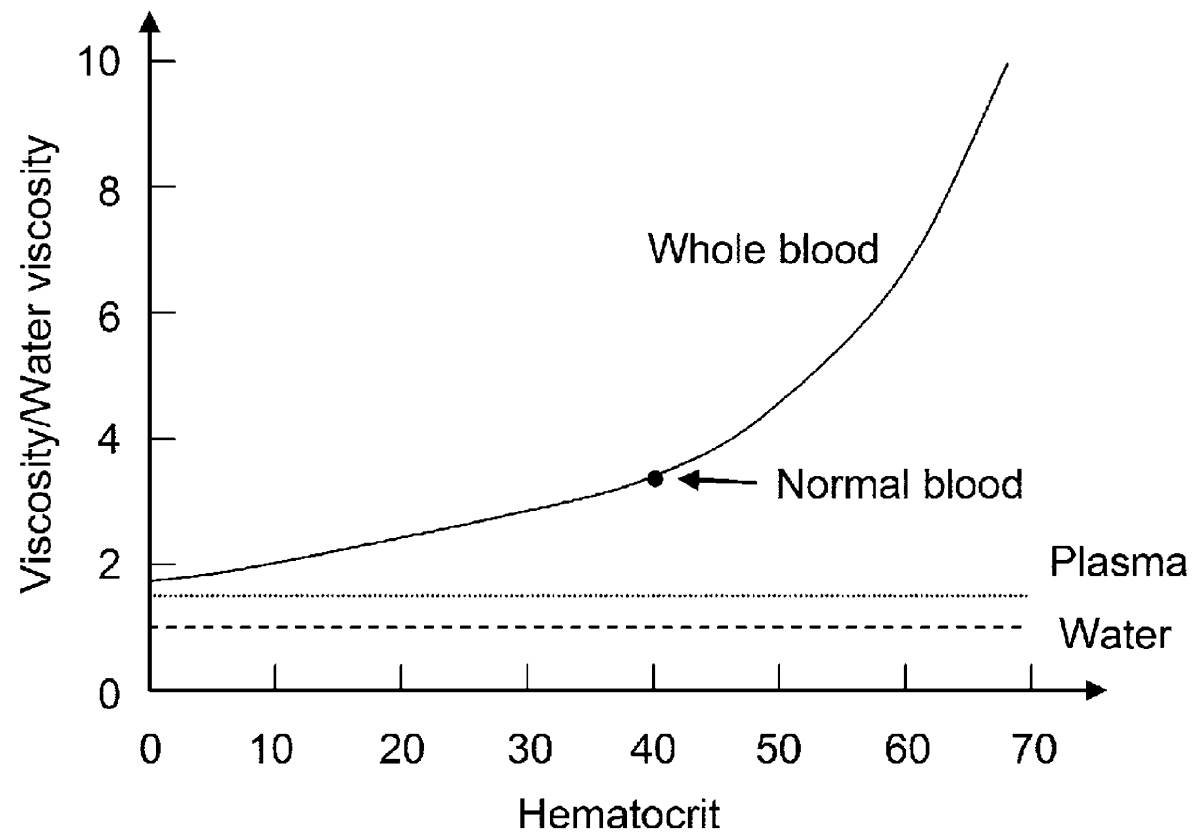
vessel	number	total length (mm)	total surface area (mm ²)	total blood volume (mm ³)
aorta	1	400	31,400	200,000
large arteries	40	8,000	163,000	260,000
main artery branches	500	50,000	377,000	220,000
terminal artery branches	11,000	110,000	415,000	120,000
arterioles	4,500,000	9,000,000	2,800,000	70,000
capillaries	19,000,000,000	19,000,000,000	298,000,000	375,000
venules	10,000,000	20,000,000	9,400,000	355,000
terminal venules	11,000	110,000	518,000	190,000
main venous branches	500	50,000	785,000	1,590,000
large veins	40	8,000	352,000	1,290,000
vena cava ^a	1 ^a	400	37,700	280,000
heart chambers	—			450,000
Total		~19,000 km	312,900,000	5,400,000

This is for a 30-yr-old male, with mass 70 kg and 5.4 L blood volume.

^aThere are really two vena cavae.



Física da Circulação



- O Sangue é um fluido altamente não Newtoniano.

Fig. 8.10. Blood viscosity vs. hematocrit. (Based on [390])