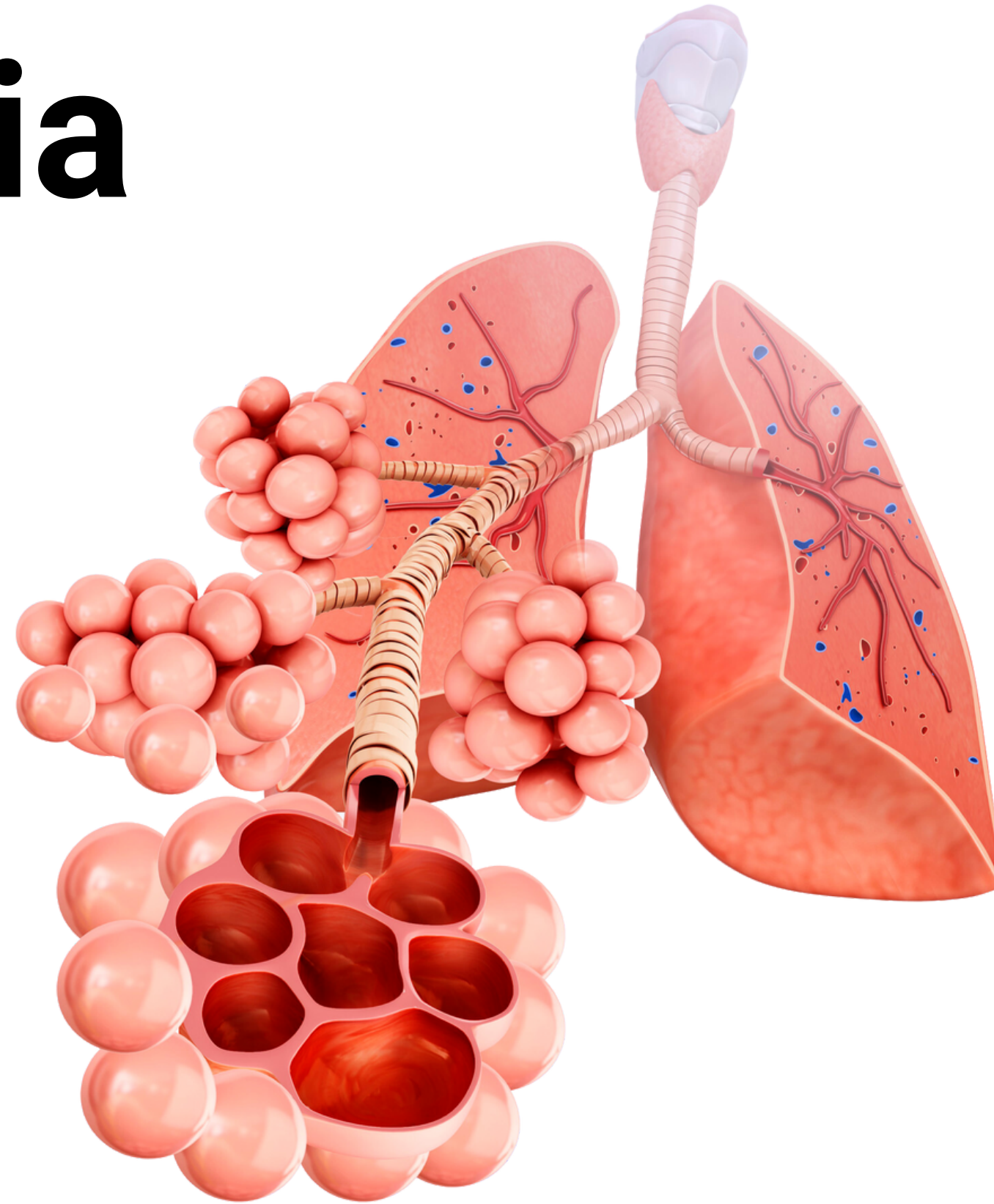




Fisiologia



Respiratória

Dr. Fernando L. Zanoni
@zanoni.anesthesia

Função geral

Captação e eliminação de O_2 e CO_2

- Importância do O_2 para o metabolismo celular
- O consumo de O_2 e a produção de CO_2 variam com a taxa metabólica
- As necessidades por O_2 podem aumentar até 30 vezes.

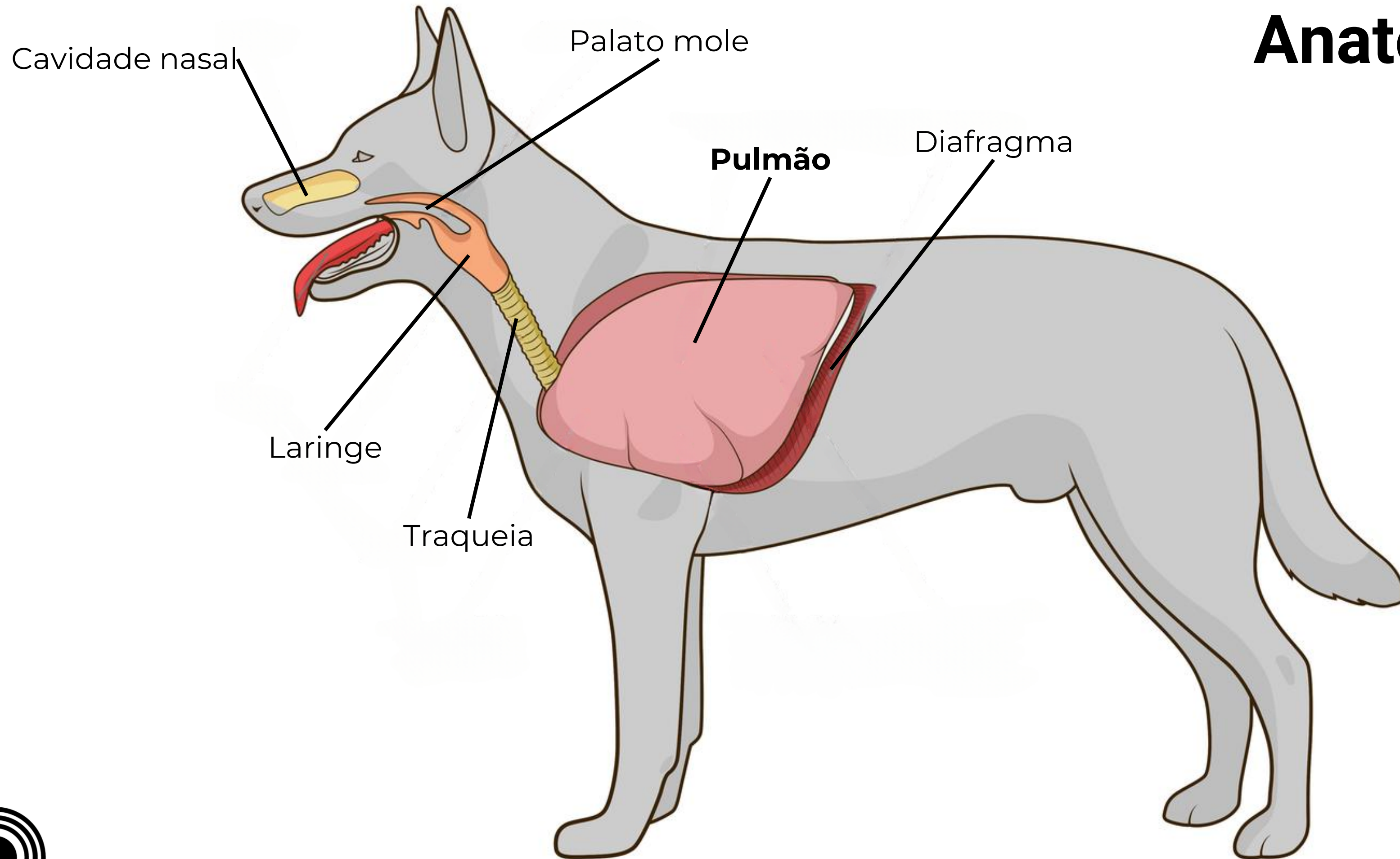


Outras funções

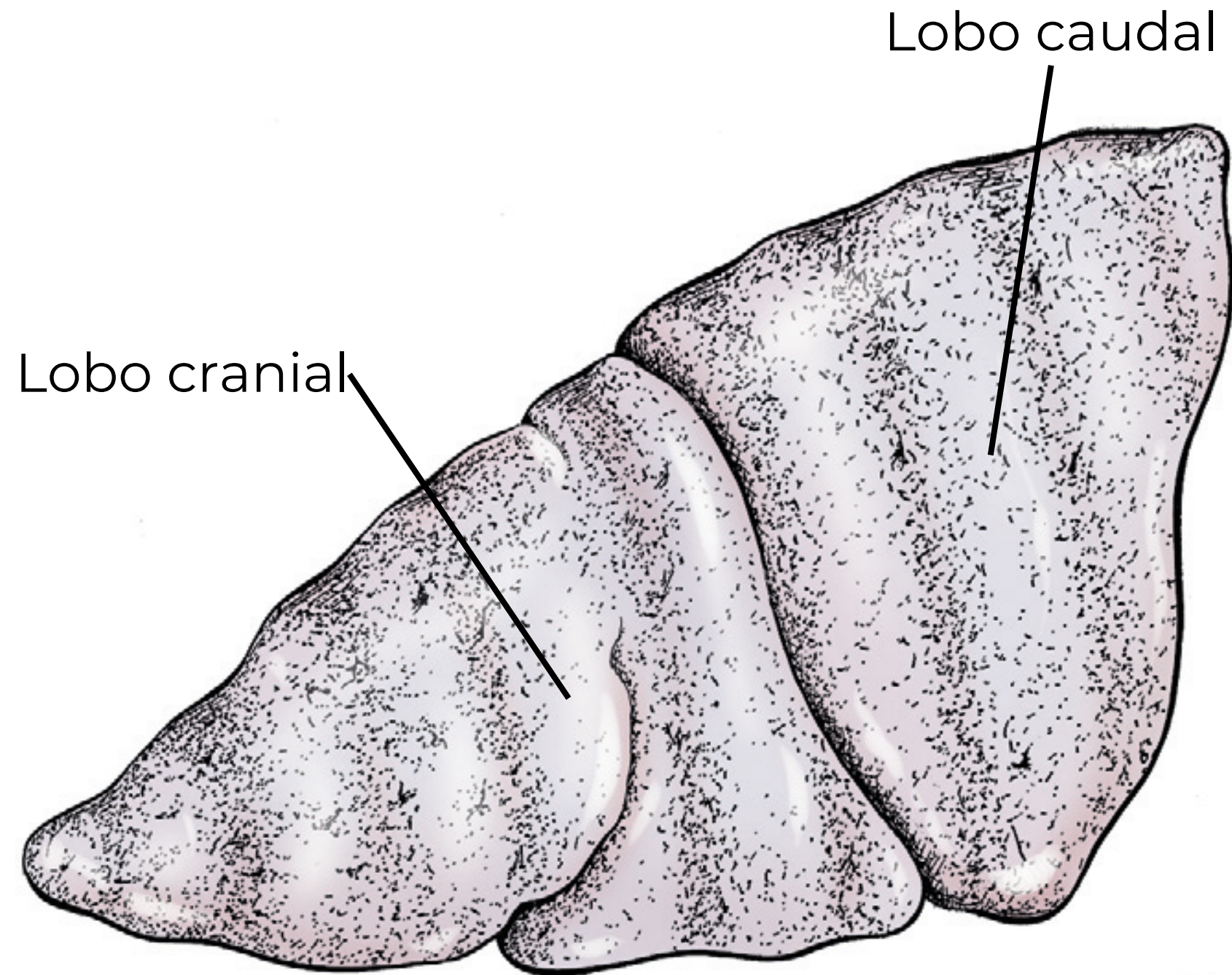
- Barreira protetora
- Metabolismo de substâncias
- Equilíbrio ácido-base
- Termorregulação



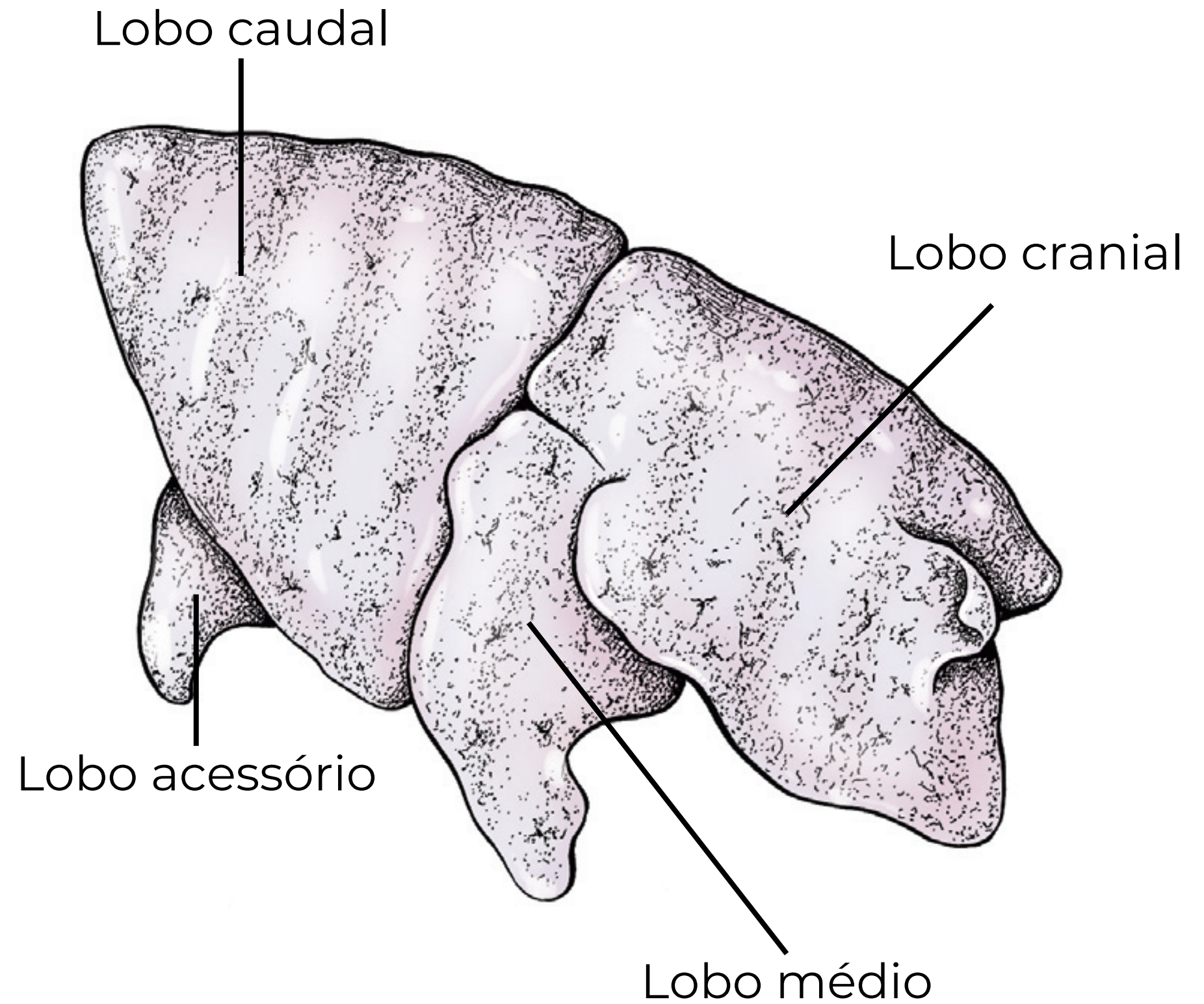
Anatomia



Pulmão esquerdo



Pulmão direito



Anatomia funcional

Vias aéreas

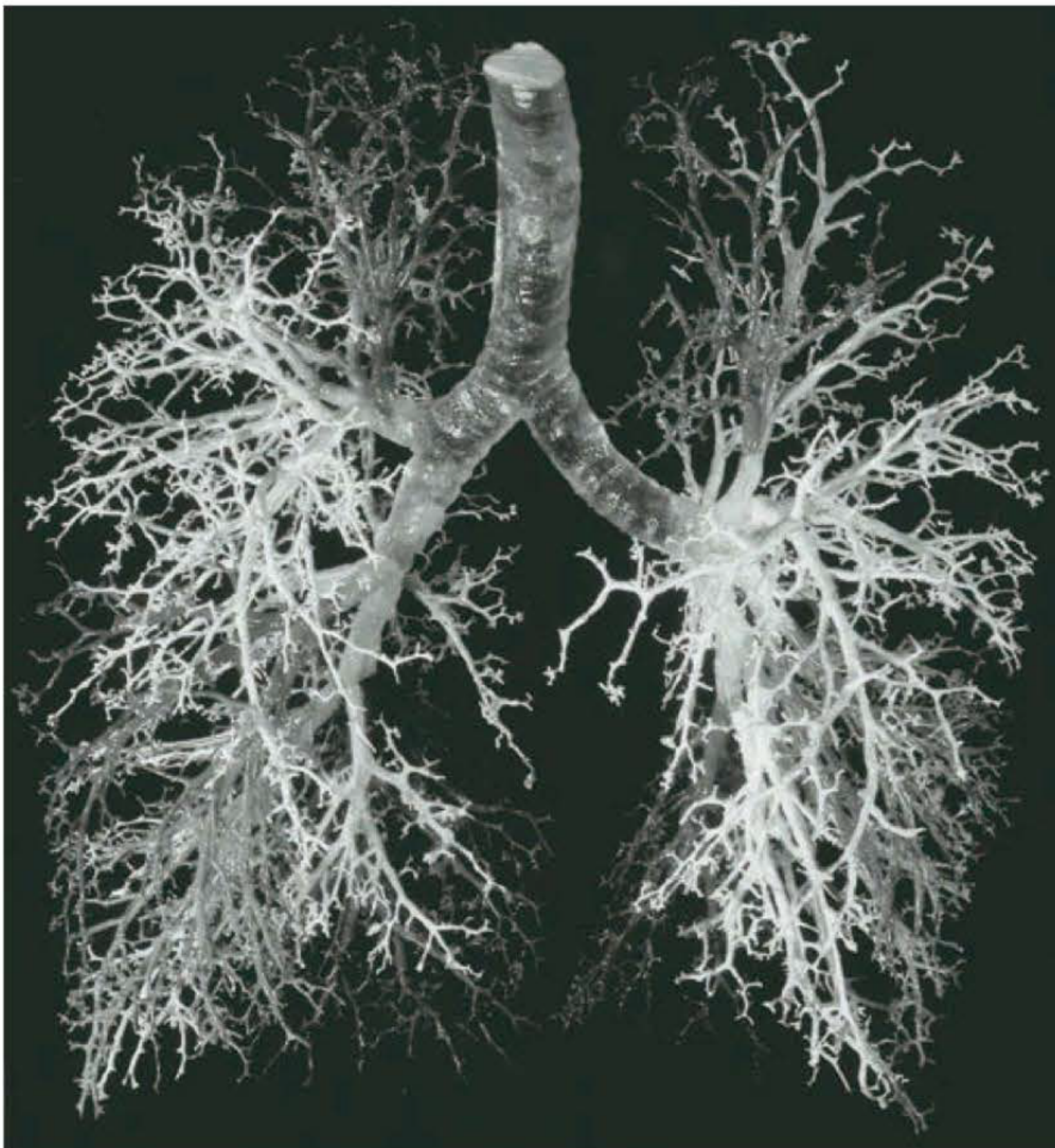
- Cavidade nasal
- Nasofaringe
- Laringe
- Traqueia
- Brônquios
- Bronquíolos

Unidade respiratória

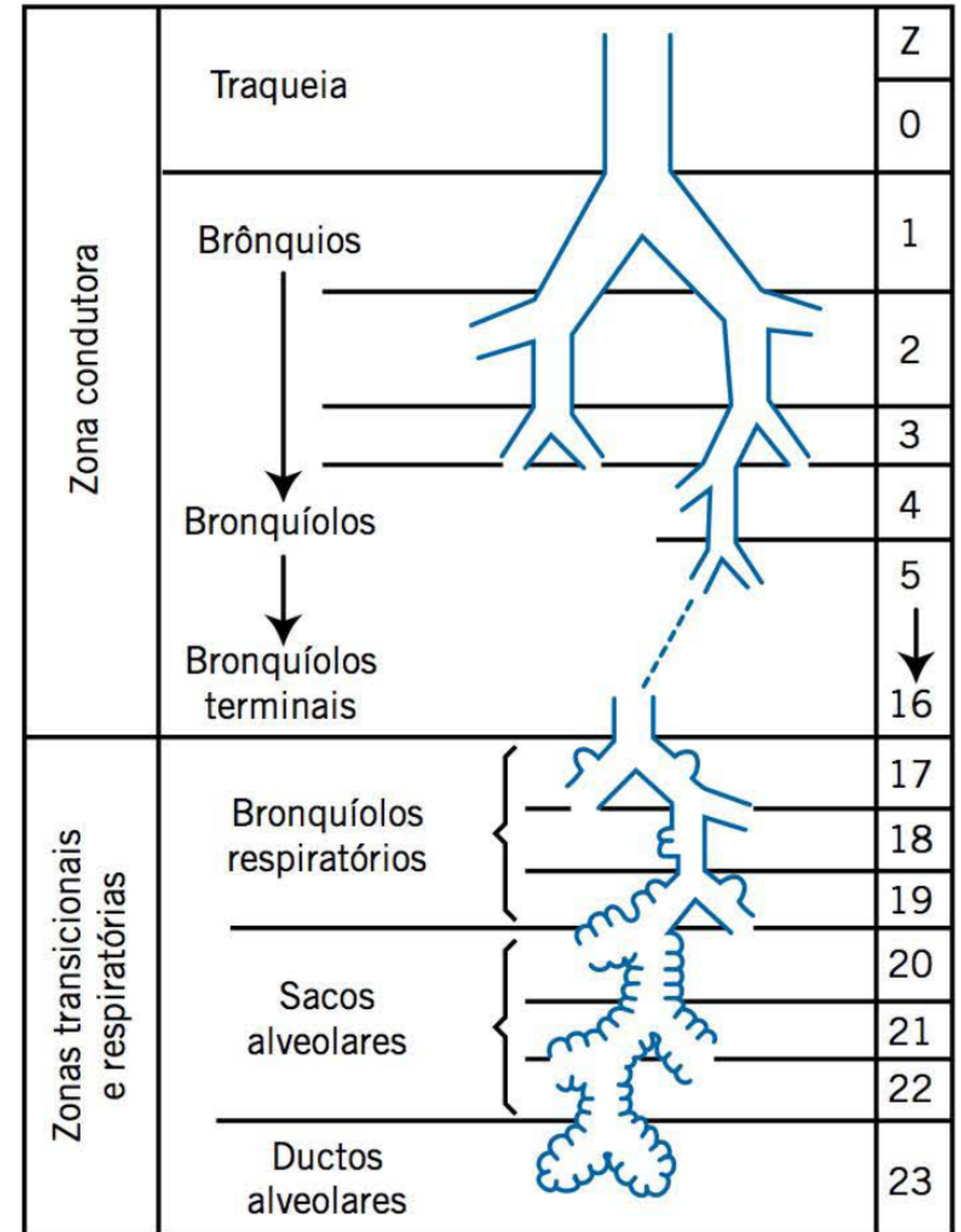
- Bronquíolos respiratórios
- Alvéolos pulmonares



Anatomia

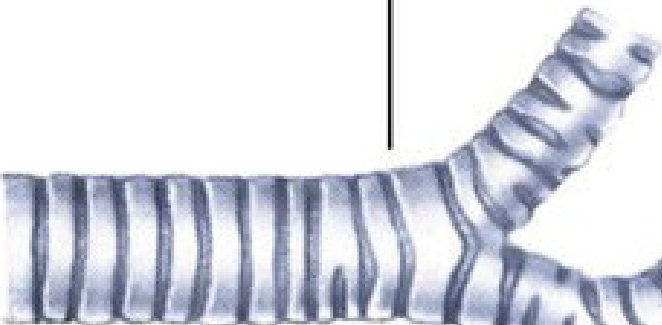
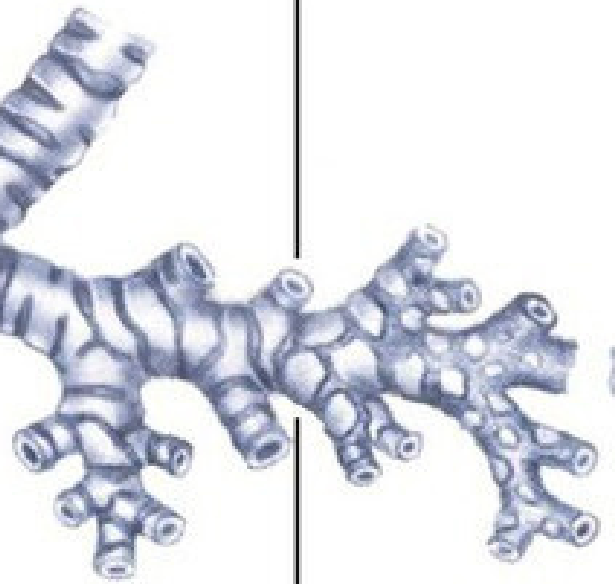

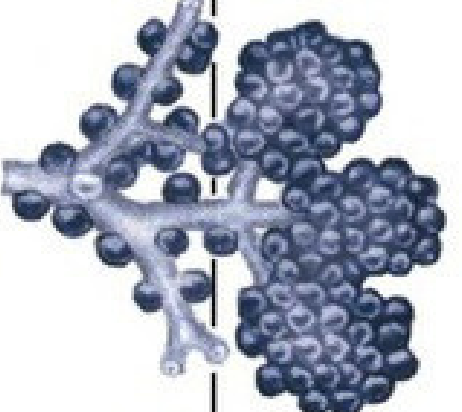



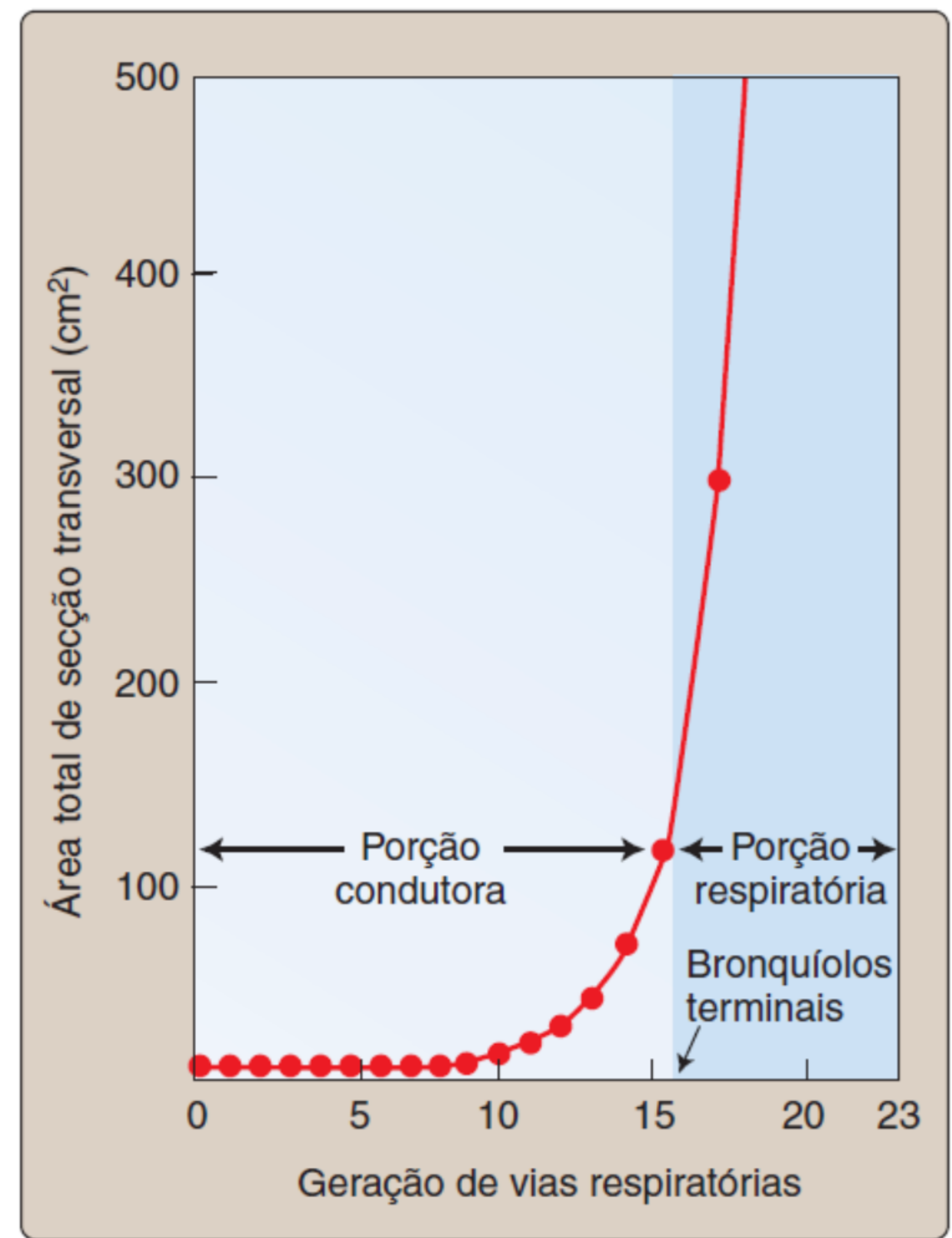
WEST, J.B. Fisiologia Respiratória, 9ª ed, 2013



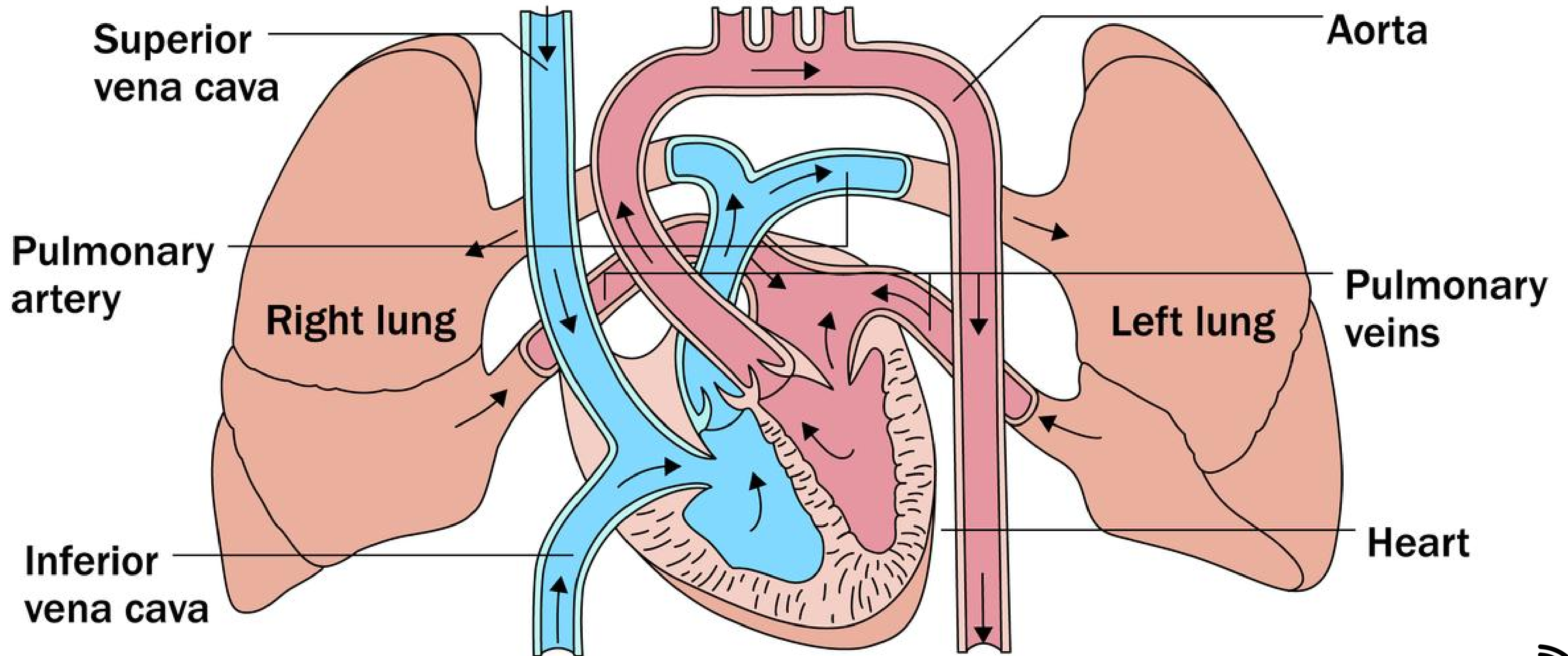
Anatomia funcional

As ramificações (gerações) da árvore brônquica aumentam a superfície de contato para troca gasosa

Conducting Airways			Respiratory Unit	
Trachea	Segmental bronchi	Subsegmental bronchi (bronchioles)		Alveolar ducts
		Nonrespiratory	Respiratory	
				
Generations	4	16	22	23



Circulação pulmonar

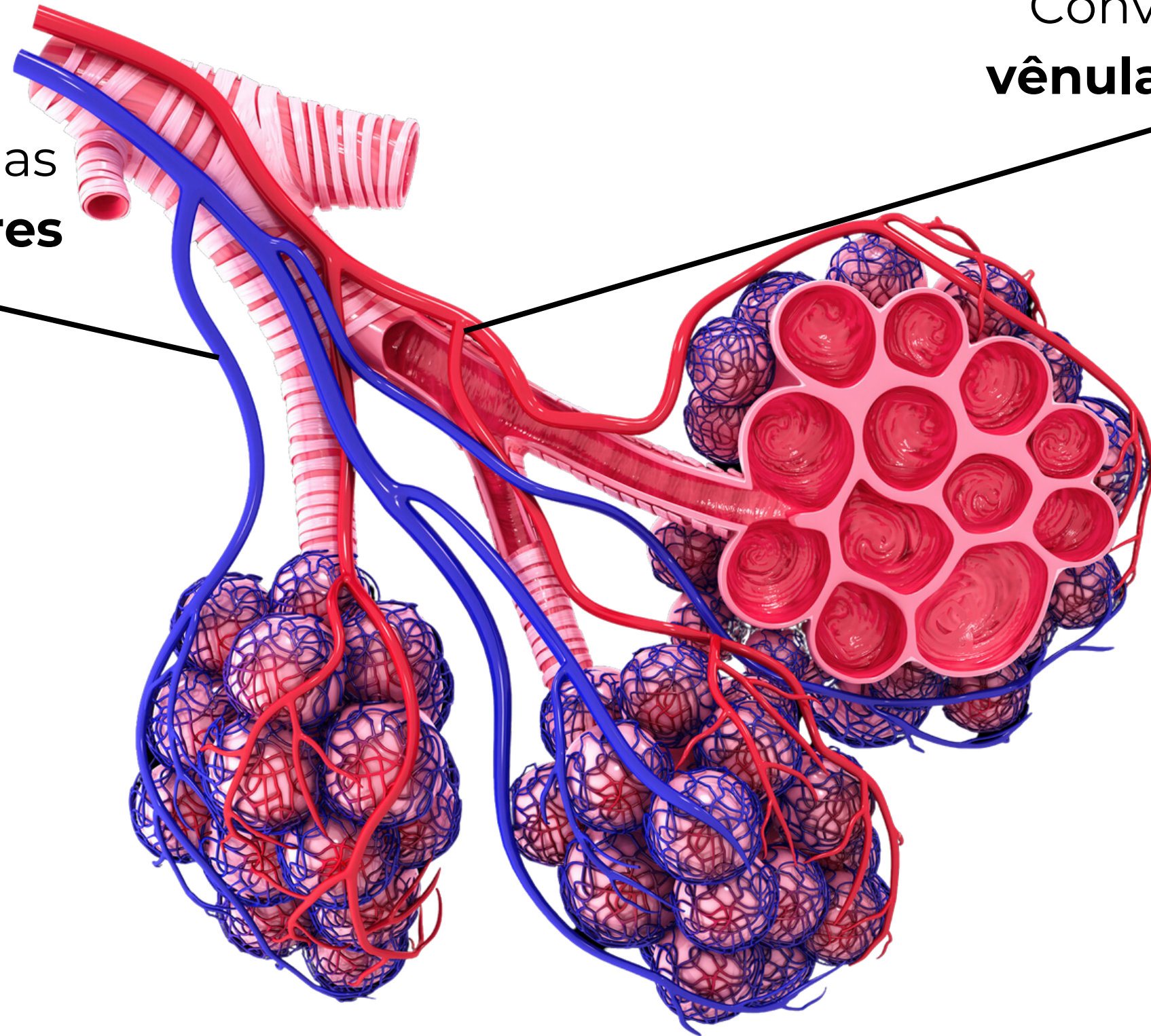


Perfusão alveolar

Capilares alveolares

✓ Originados a partir das **arteríolas pulmonares**

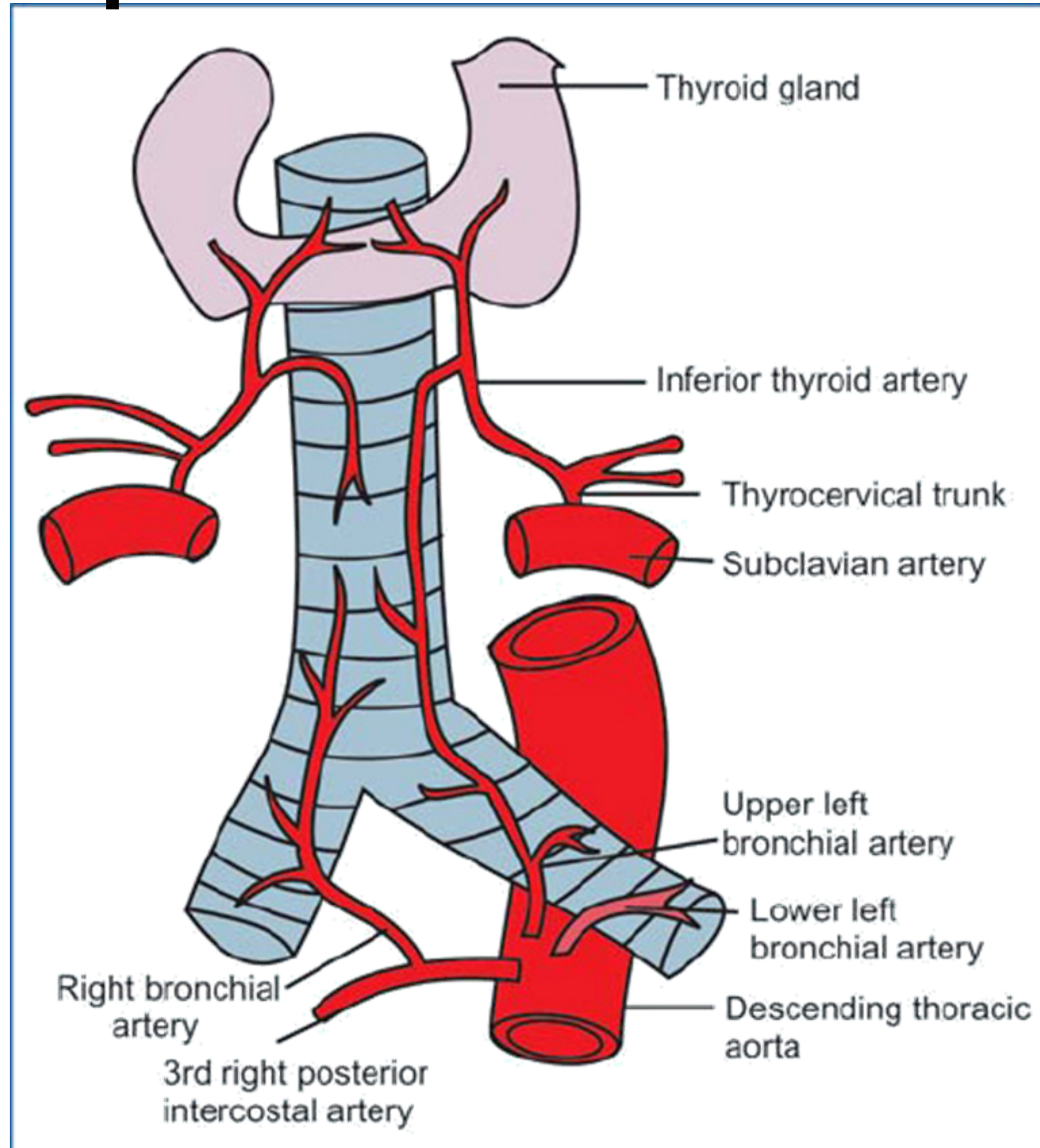
Convergem para as **vênulas pulmonares** ✓



Circulação traqueobrônquica

Artérias brônquicas

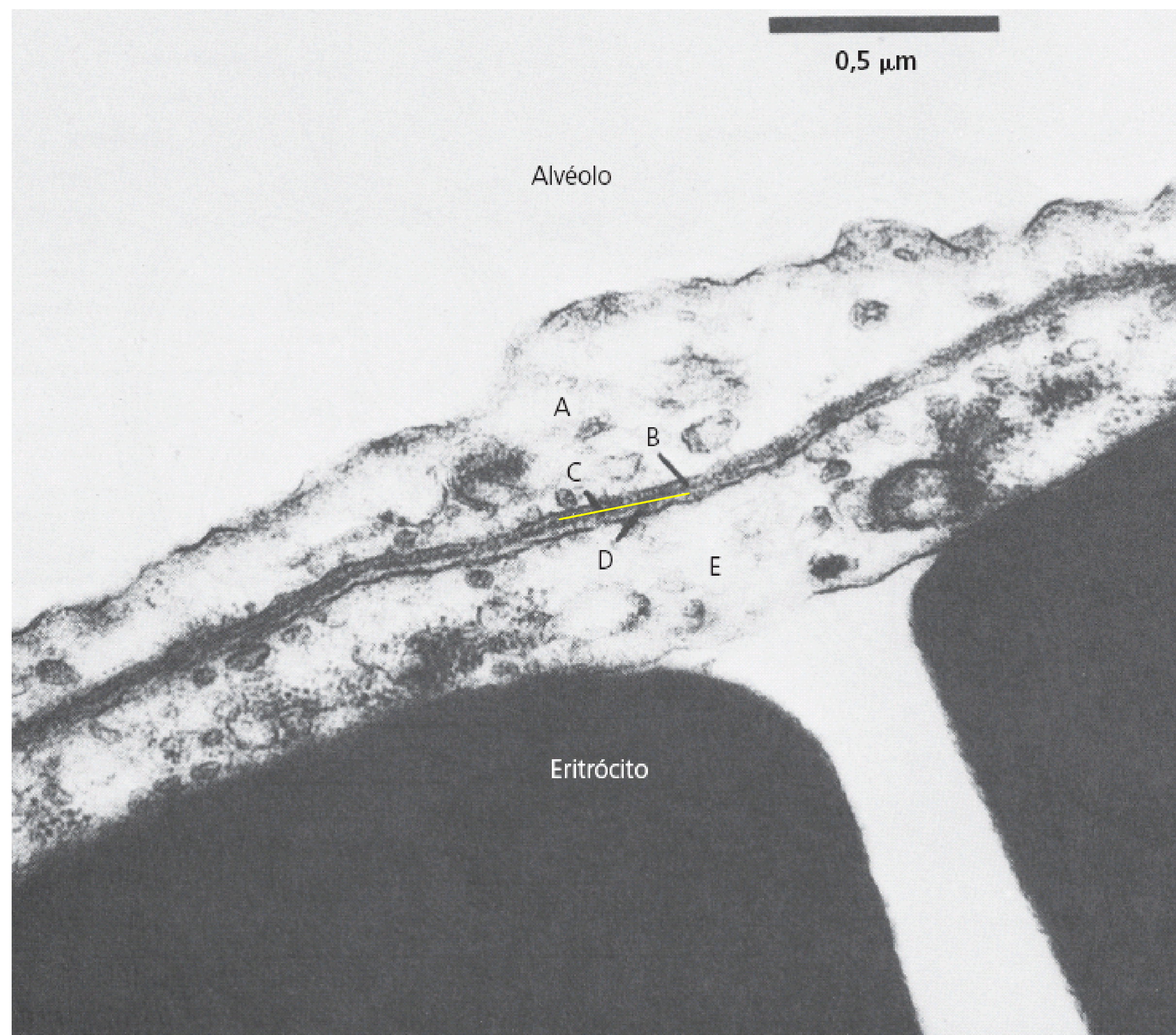
- Circulação sistêmica
- Aorta descendente
- Artéria subclávia

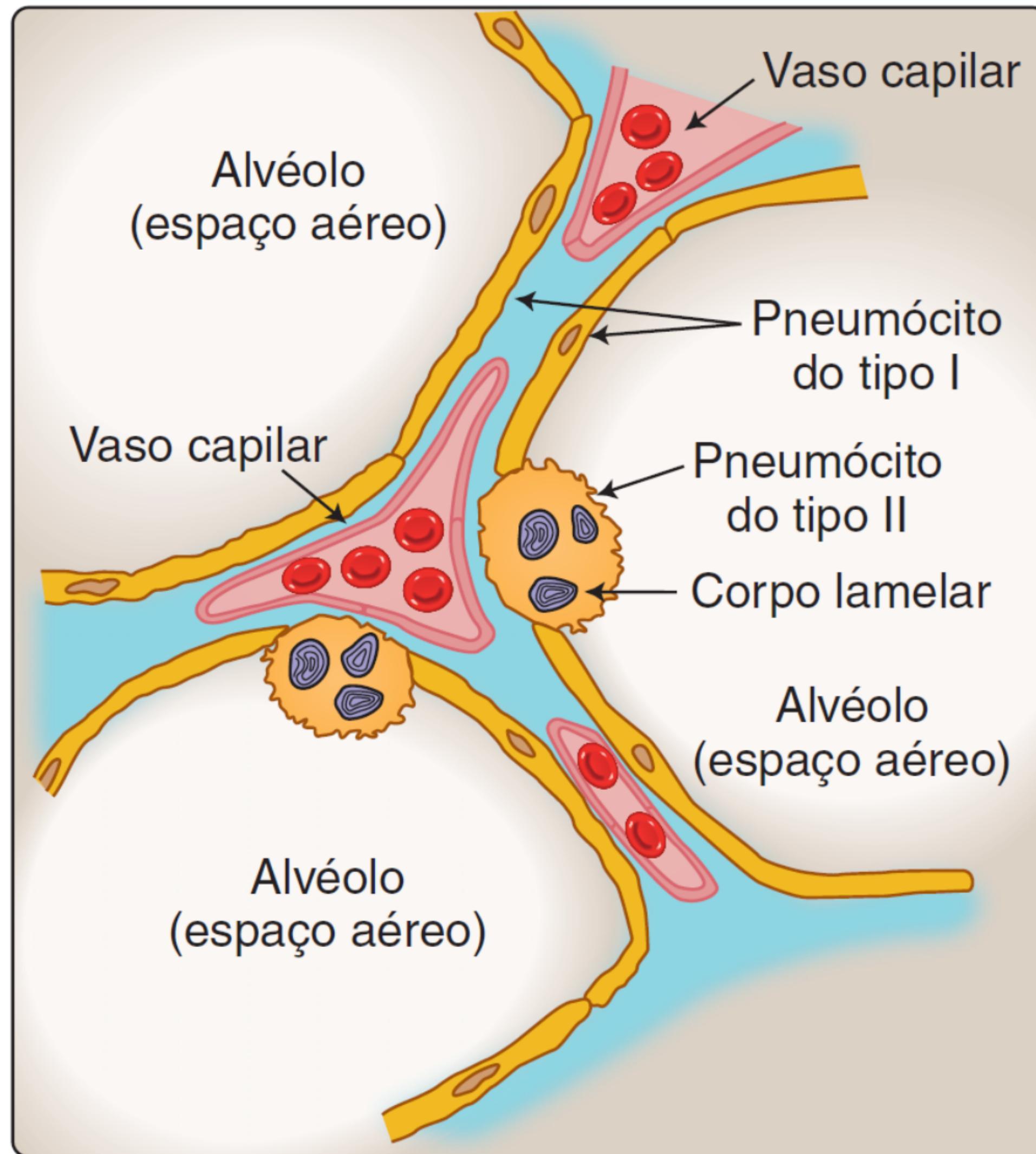


Membrana respiratória

- ✓ Epitélio Alveolar **(A)**
- ✓ Membrana basal epitelial **(B)** e endotelial **(D)**
- ✓ Espaço intersticial **(C)**
- ✓ Endotélio capilar **(E)**

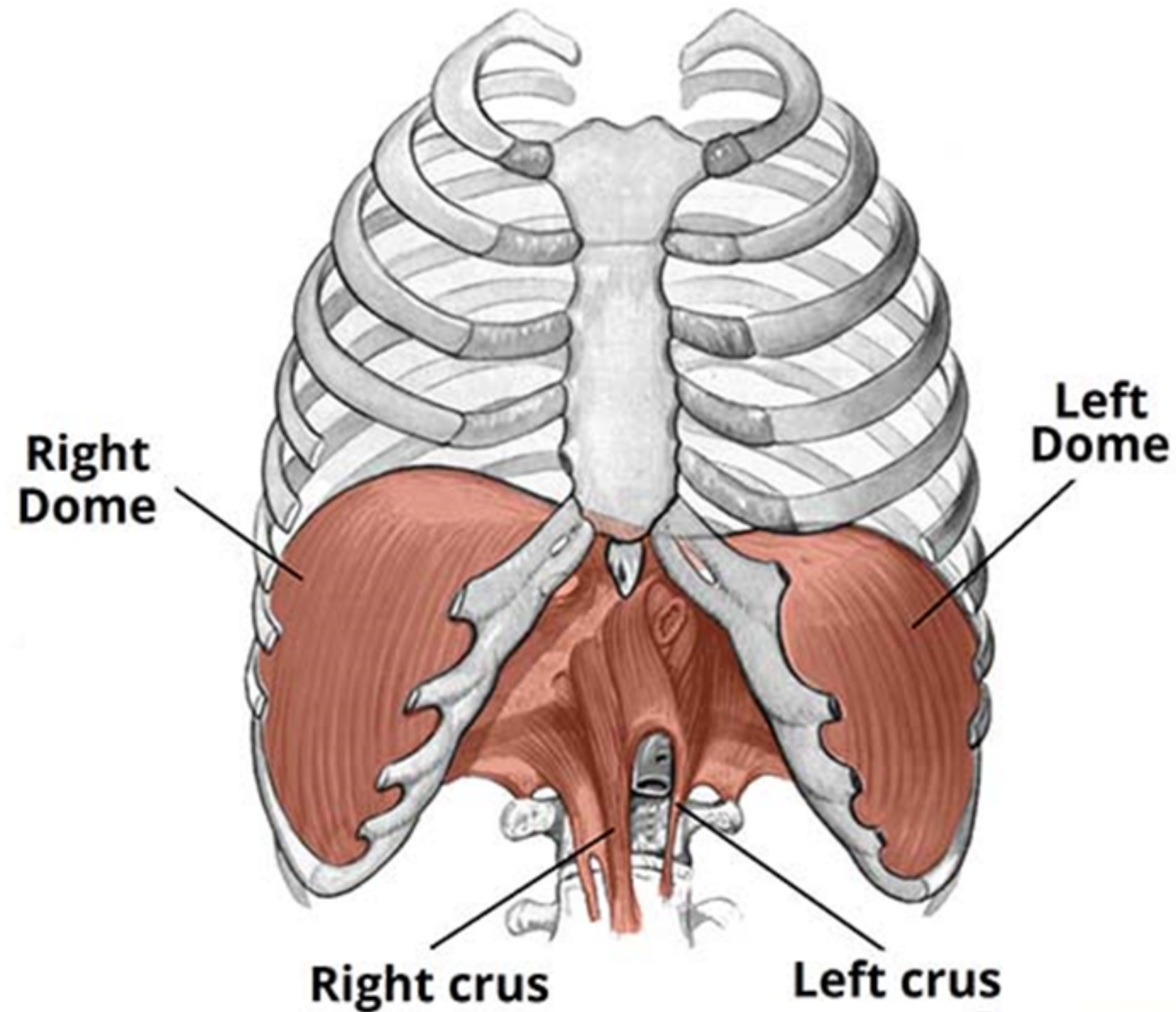
Espessura:
~500 nM (0,5 μm)





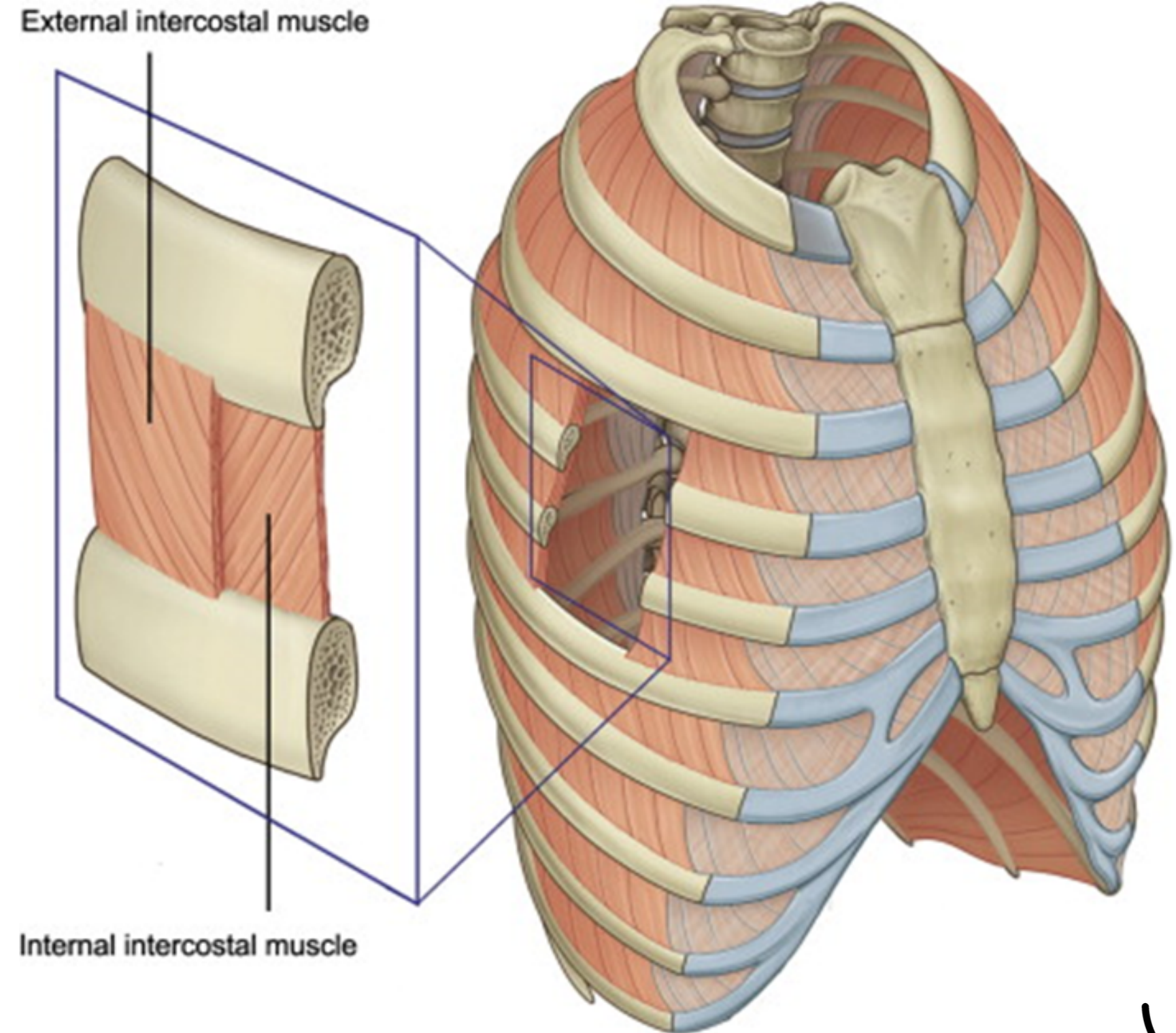
Músculos da respiração

Diafragma



© TeachMeAnatomy...

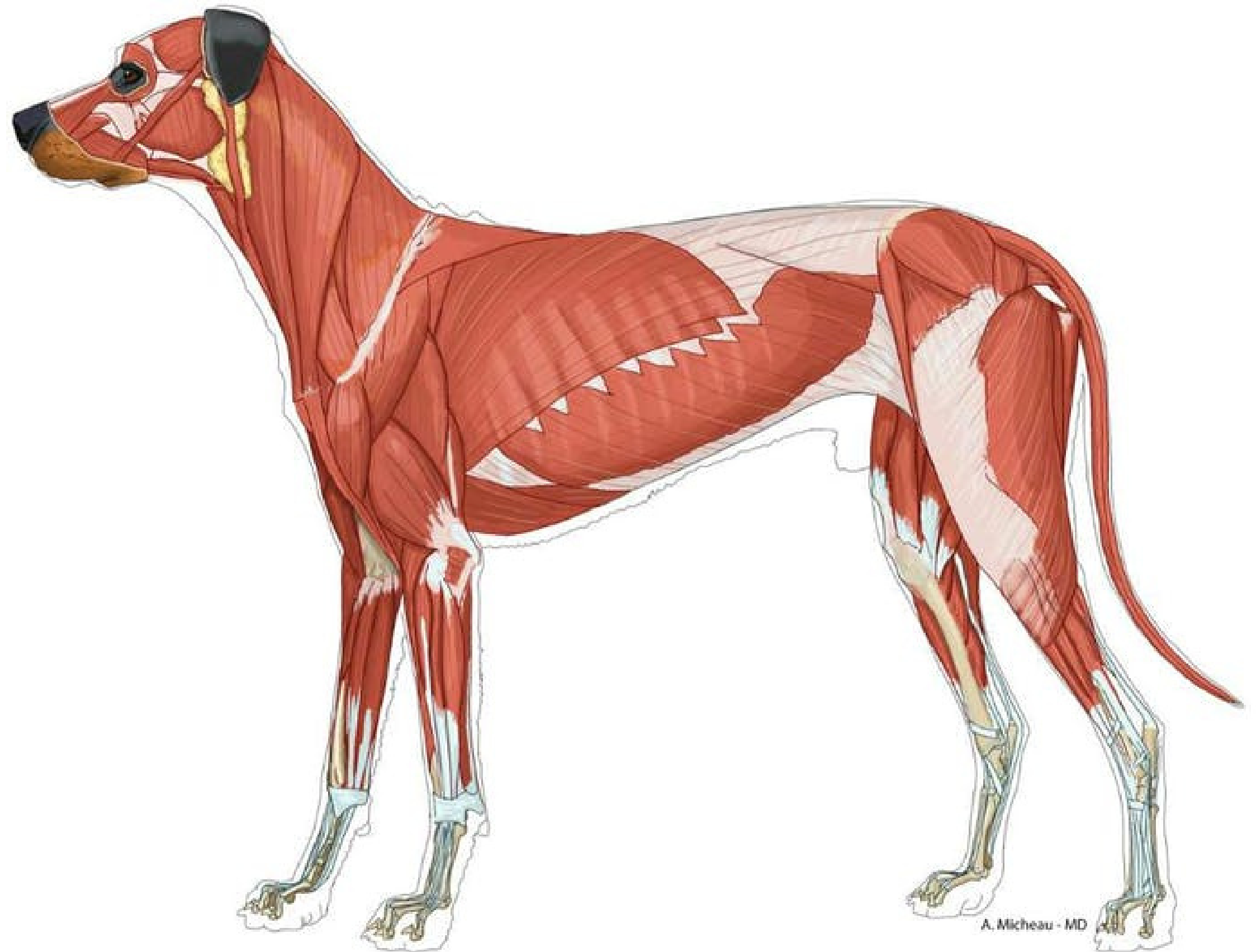
Intercostais



Músculos da respiração

Peitorais

Abdominais



Mecânica da respiração

Na inspiração normal

✓ Contração do diafragma

75% da mecânica

✓ Contração dos intercostais **externos**

25% da mecânica



Mecânica da respiração

Na inspiração normal

✓ Contração do diafragma

75% da mecânica

✓ Contração dos intercostais **externos**

25% da mecânica

Na expiração normal

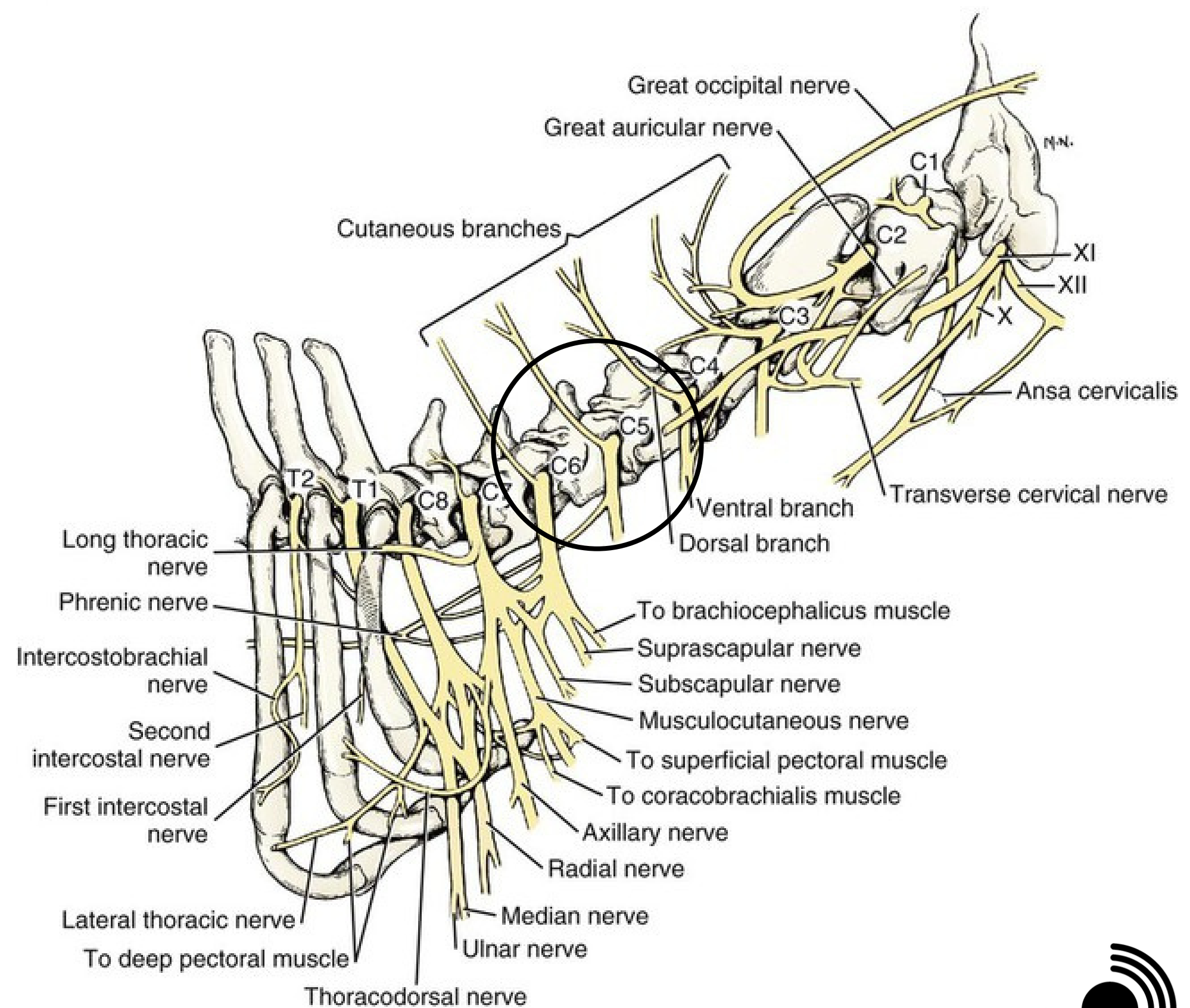
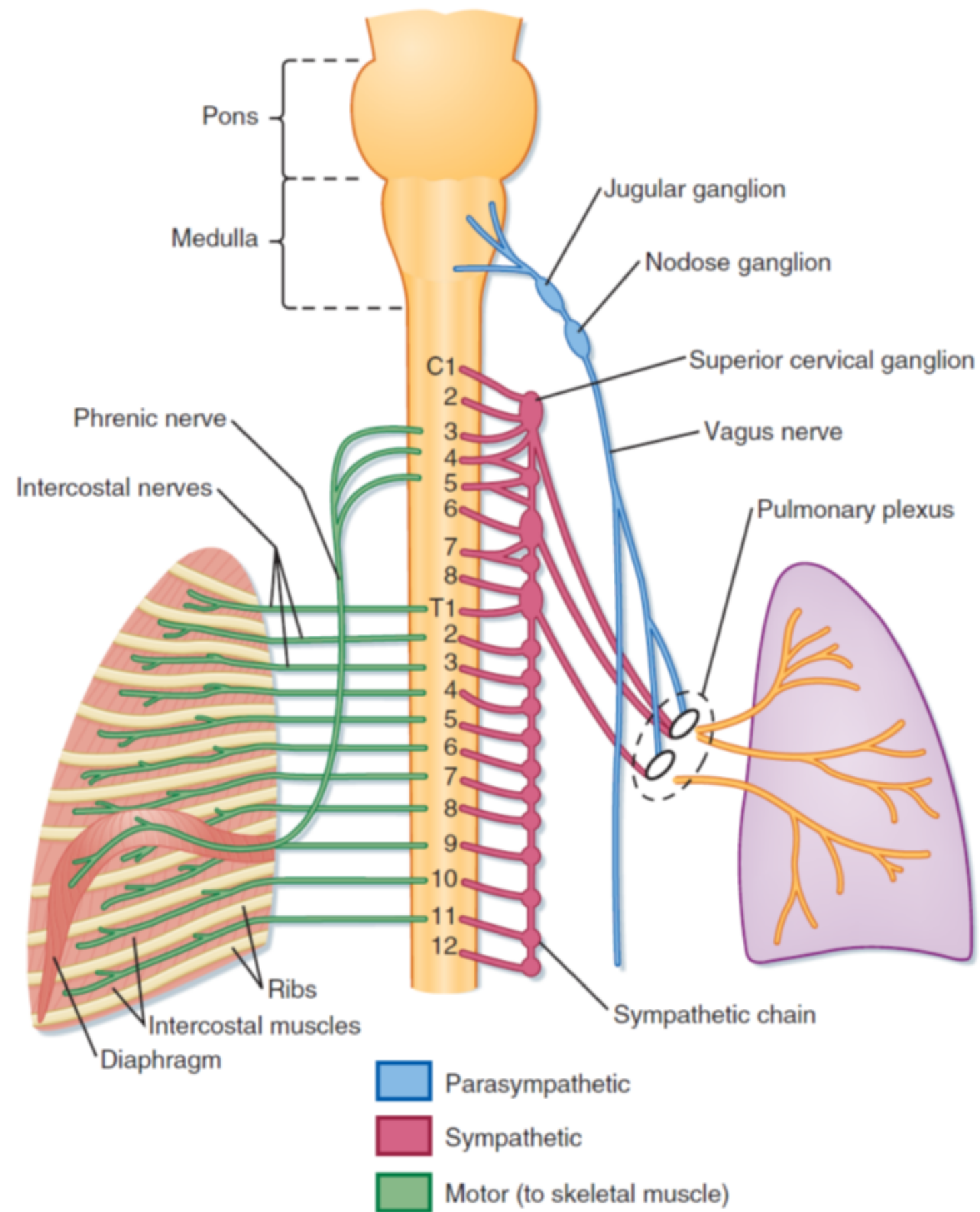
✓ Relaxamento do diafragma

✓ Relaxamento dos intercostais **externos**

Processo
passivo



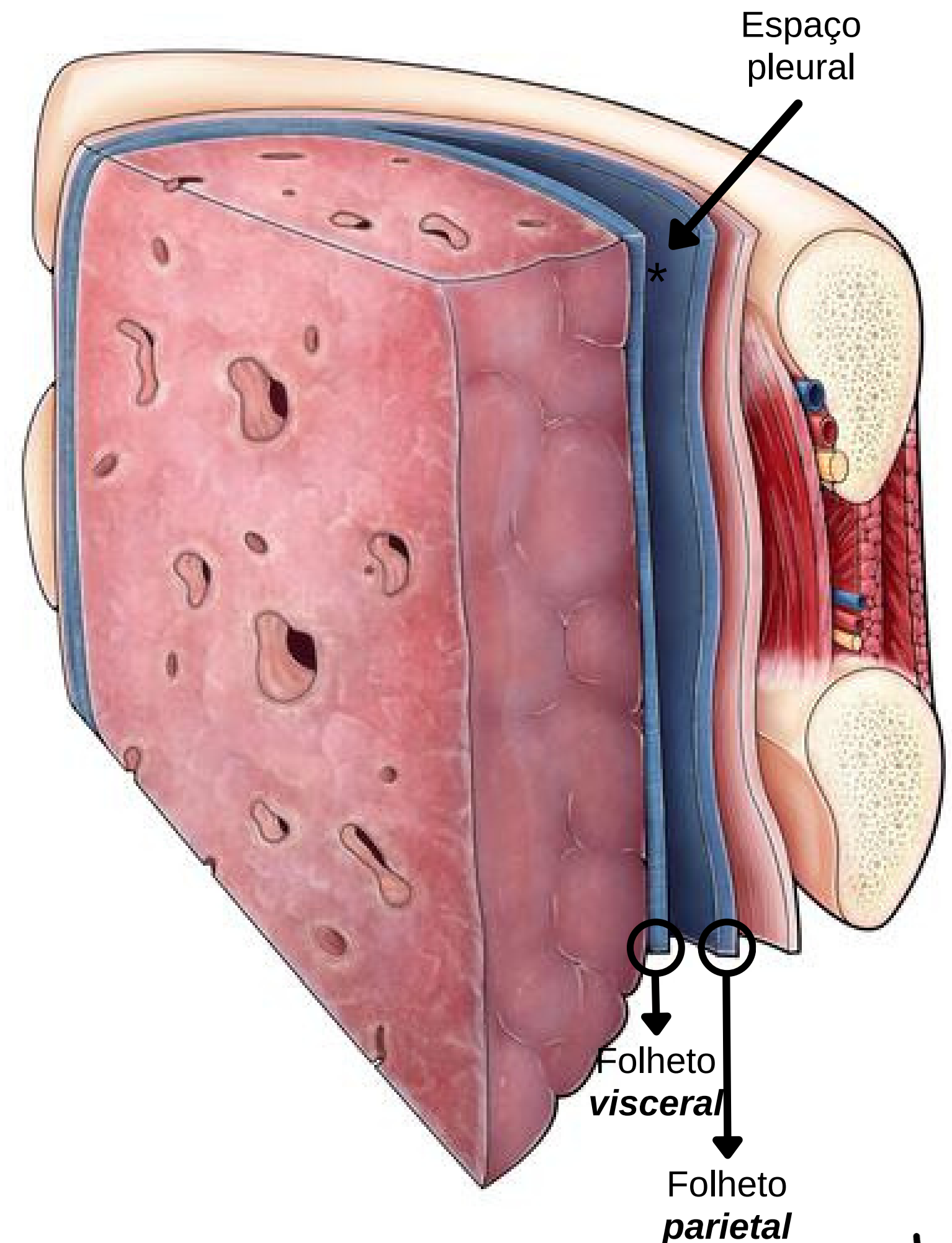
Inervação dos músculos respiratórios



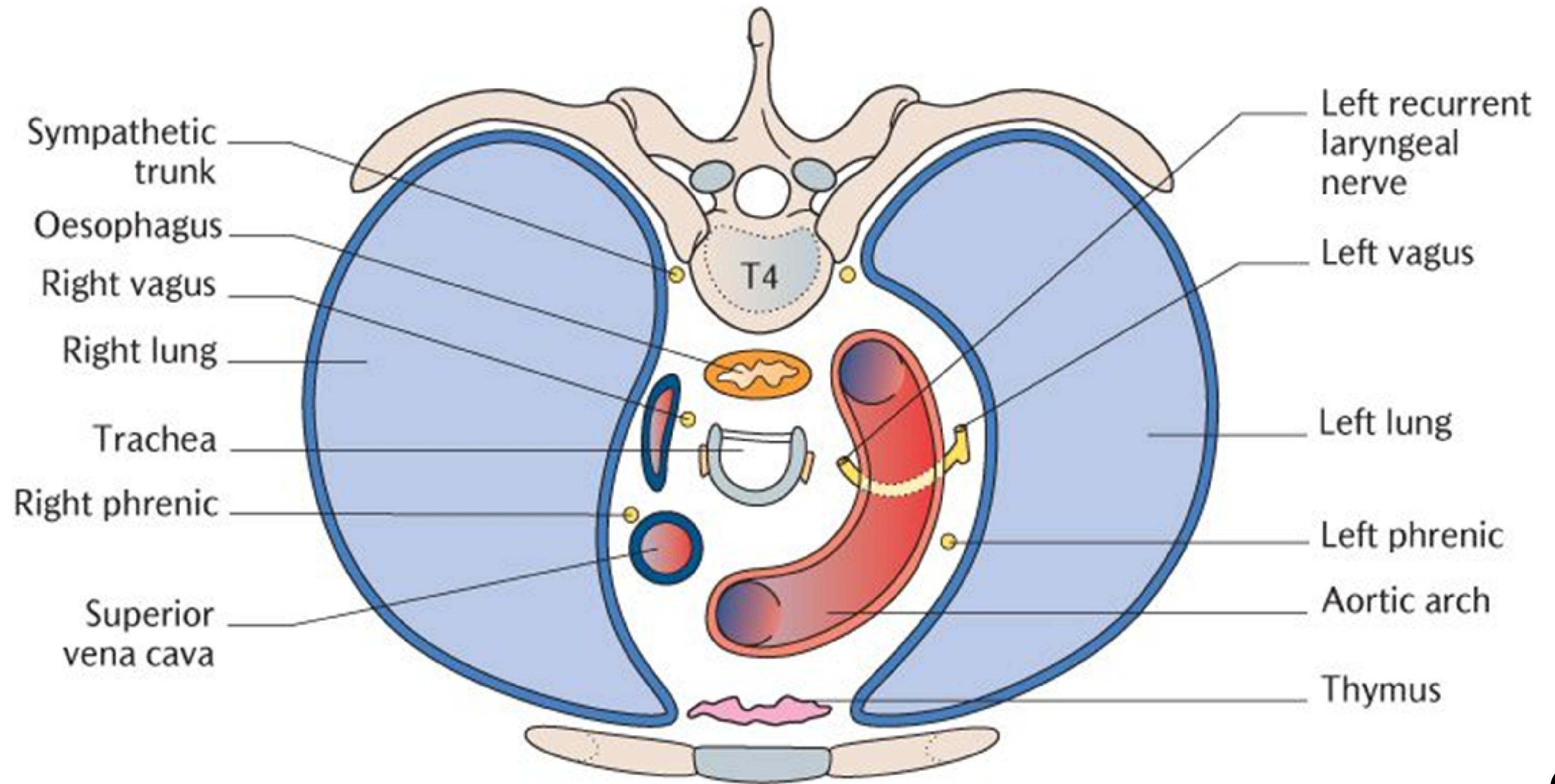
Pleura e espaço pleural

Serosa que reveste internamente a parede torácica (pleura parietal) e externamente o pulmão (pleura visceral)

Também delimita um espaço (mediastino) por onde passam grandes vasos, esôfago, traqueia e coração



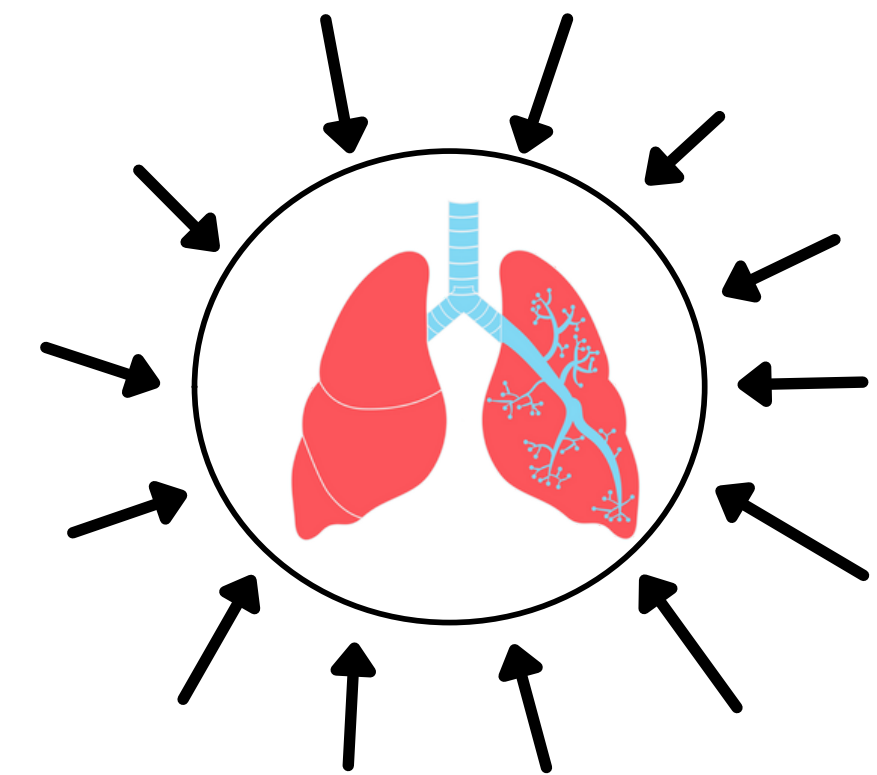
Mediastino



Espaço pleural

- ✔ Ínfima quantidade de fluido (deslizamento dos folhetos)
- ✔ Os folhetos estão sempre unidos, sob pressão negativa
- ✔ Os pulmões sofrem continuamente retração elástica

Fibras
elásticas
(setas)



Pressões no tórax e nos pulmões

Pressão pleural

- ✓ Pressão intratorácica (fora dos pulmões)
- ✓ Sempre **subatmosférica** (negativa)

Pressão no mediastino

- ✓ Pressão **pleural** transmitida ao mediastino
- ✓ Impacto em **veia cava**, esôfago e ducto linfático torácico

Pressão intrapulmonar

- ✓ Pressão **dentro do alvéolo** (alveolar)
- ✓ Se transmite também para as vias aéreas



Pressões no tórax e nos pulmões

Pressão pleural

- ✓ Fica **MAIS NEGATIVA** na **INSPIRAÇÃO**
- ✓ Fica **MENOS NEGATIVA** na **EXPIRAÇÃO**

Pressão no mediastino

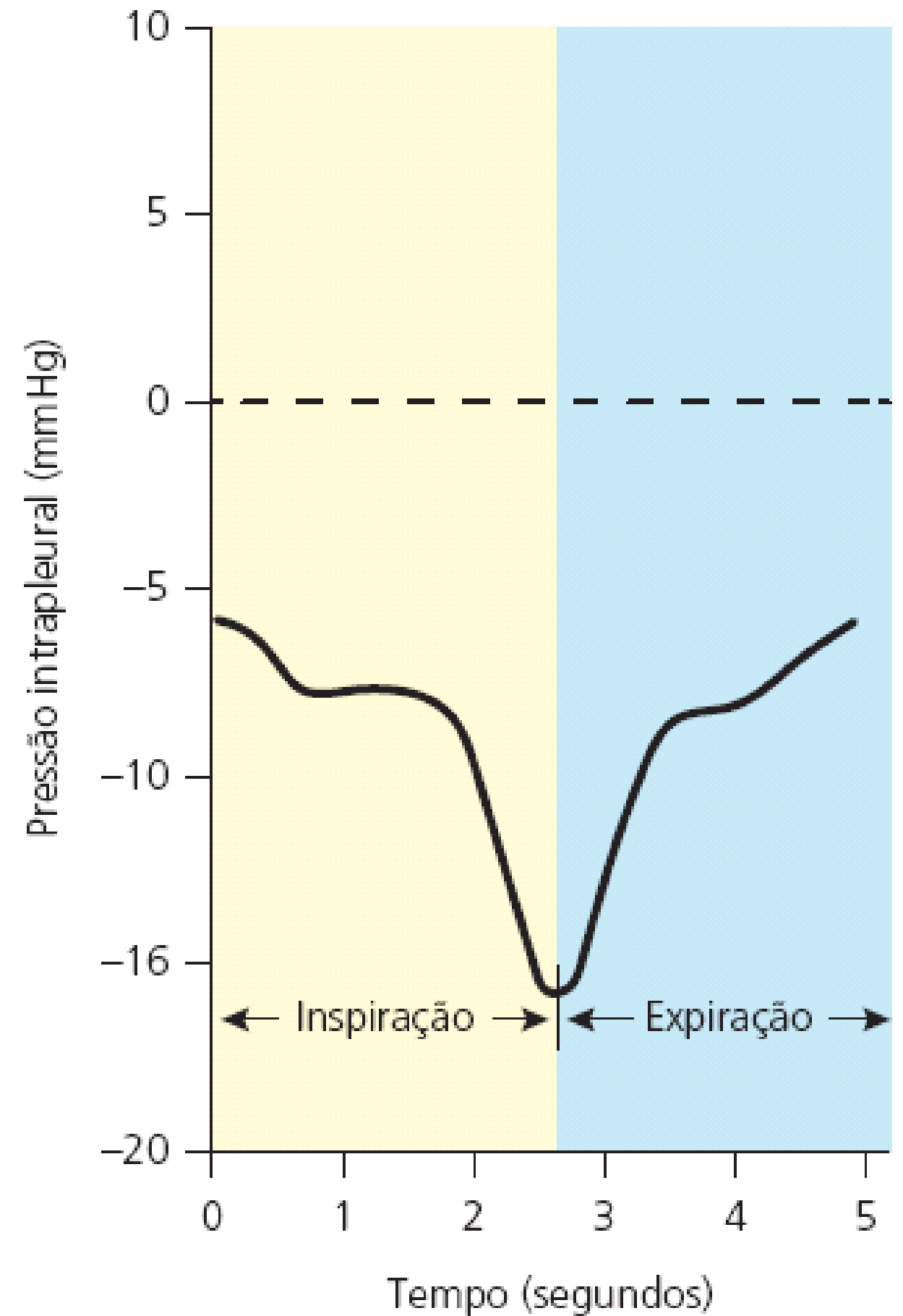
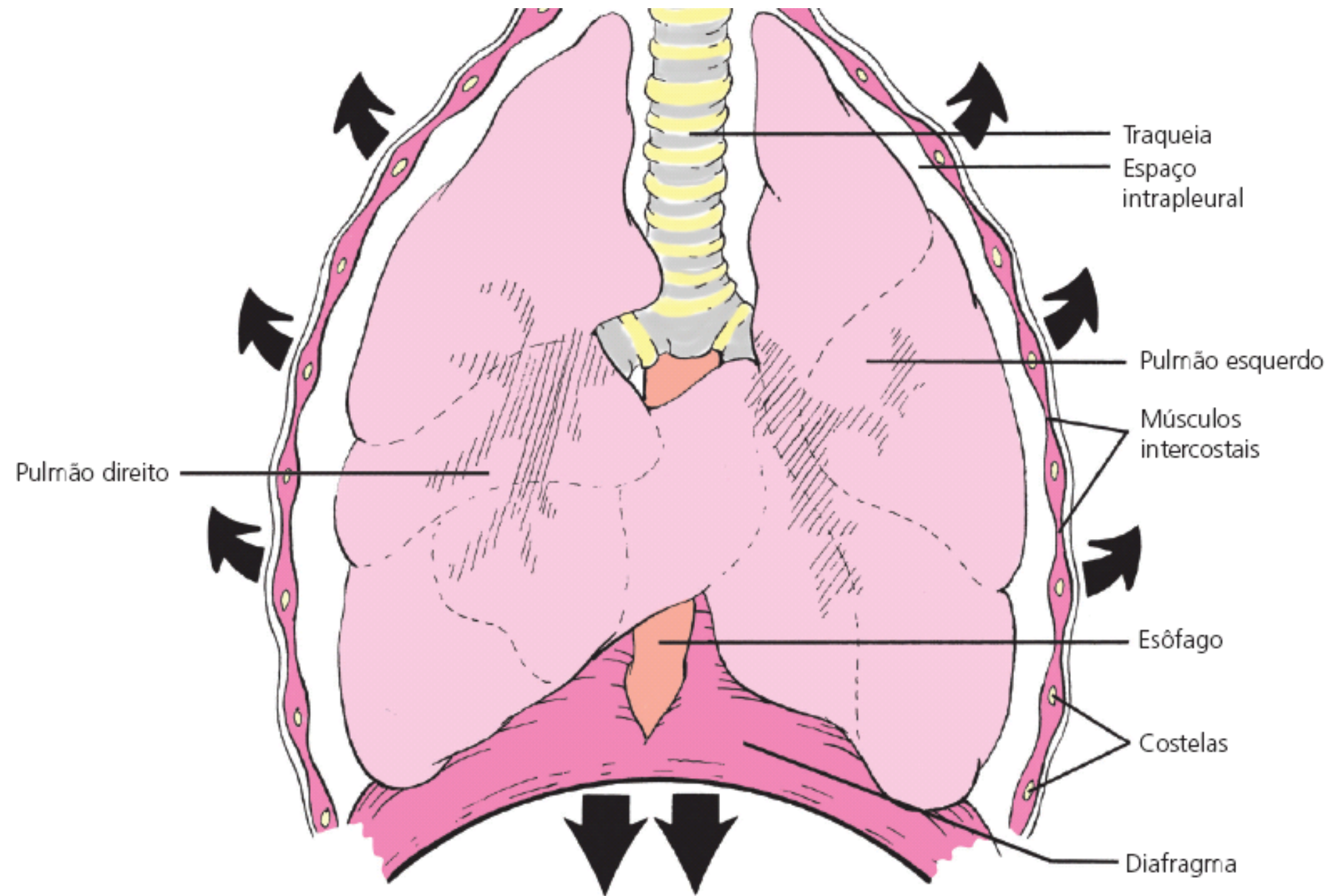
- ✓ Fica **MAIS NEGATIVA** na **INSPIRAÇÃO**
- ✓ Fica **MENOS NEGATIVA** na **EXPIRAÇÃO**

Pressão intrapulmonar

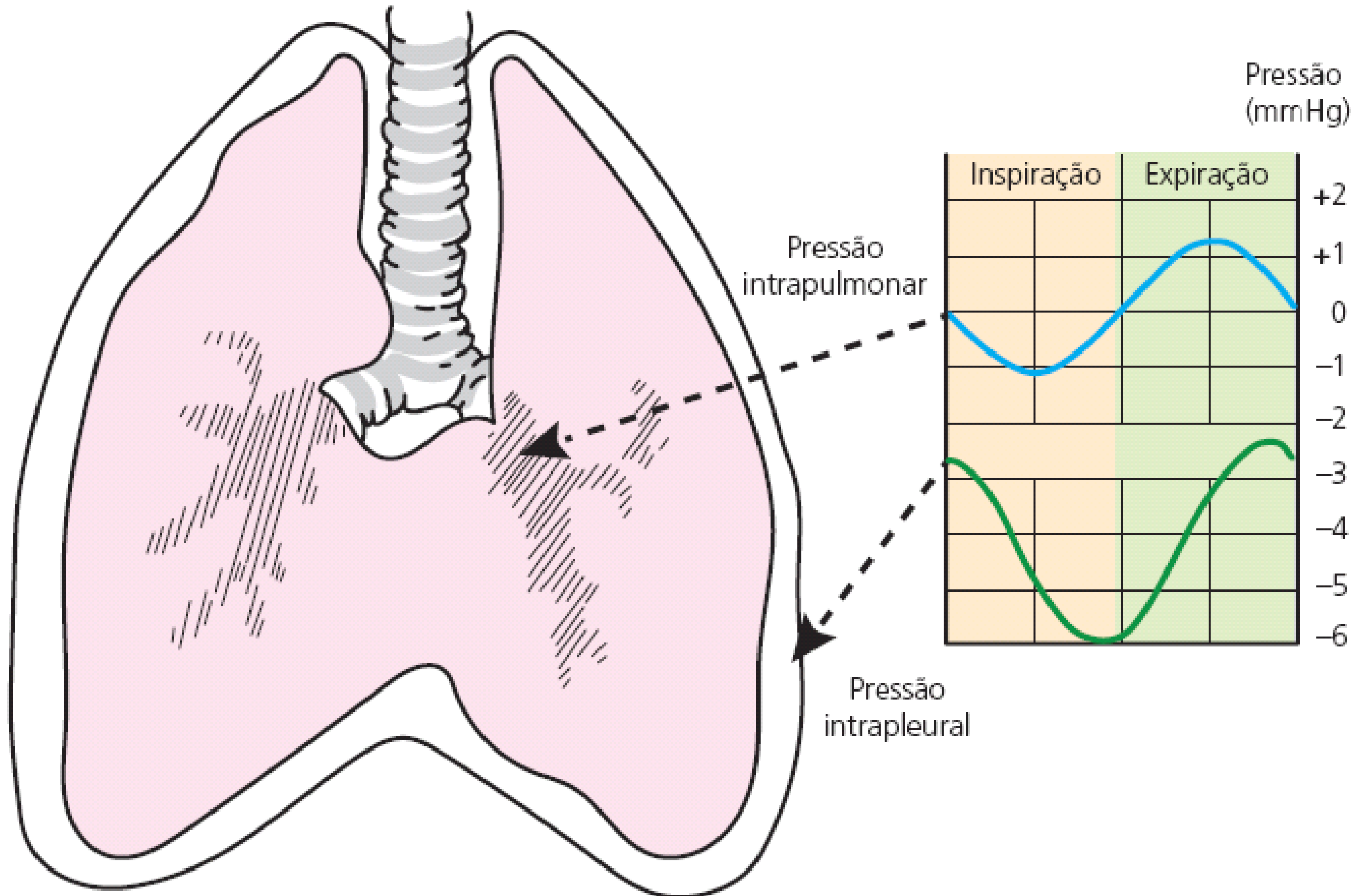
- ✓ Fica **NEGATIVA** durante a **INSPIRAÇÃO**
- ✓ Fica **POSITIVA** durante a **EXPIRAÇÃO**

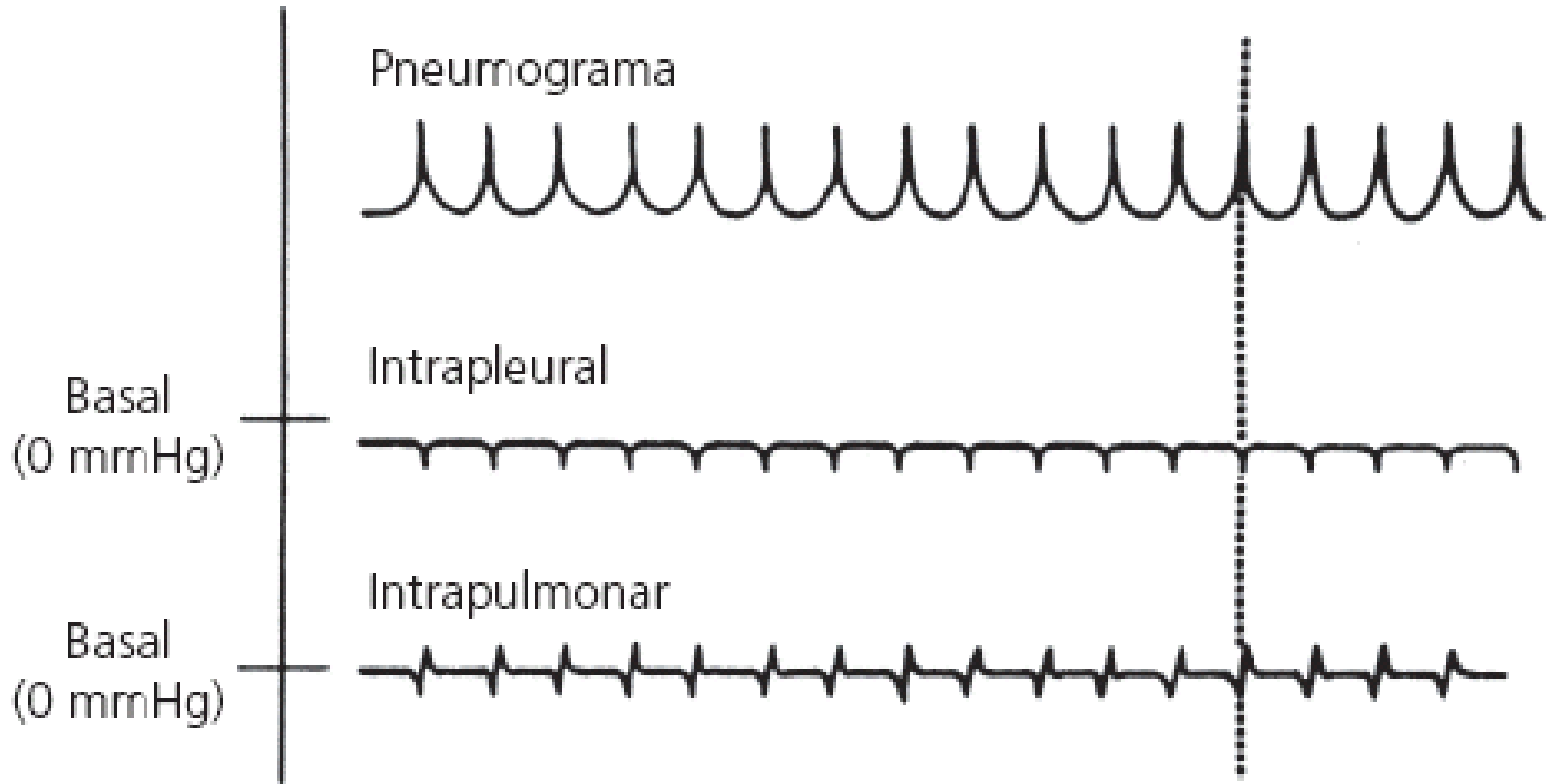


Pressão pleural (intratorácica)

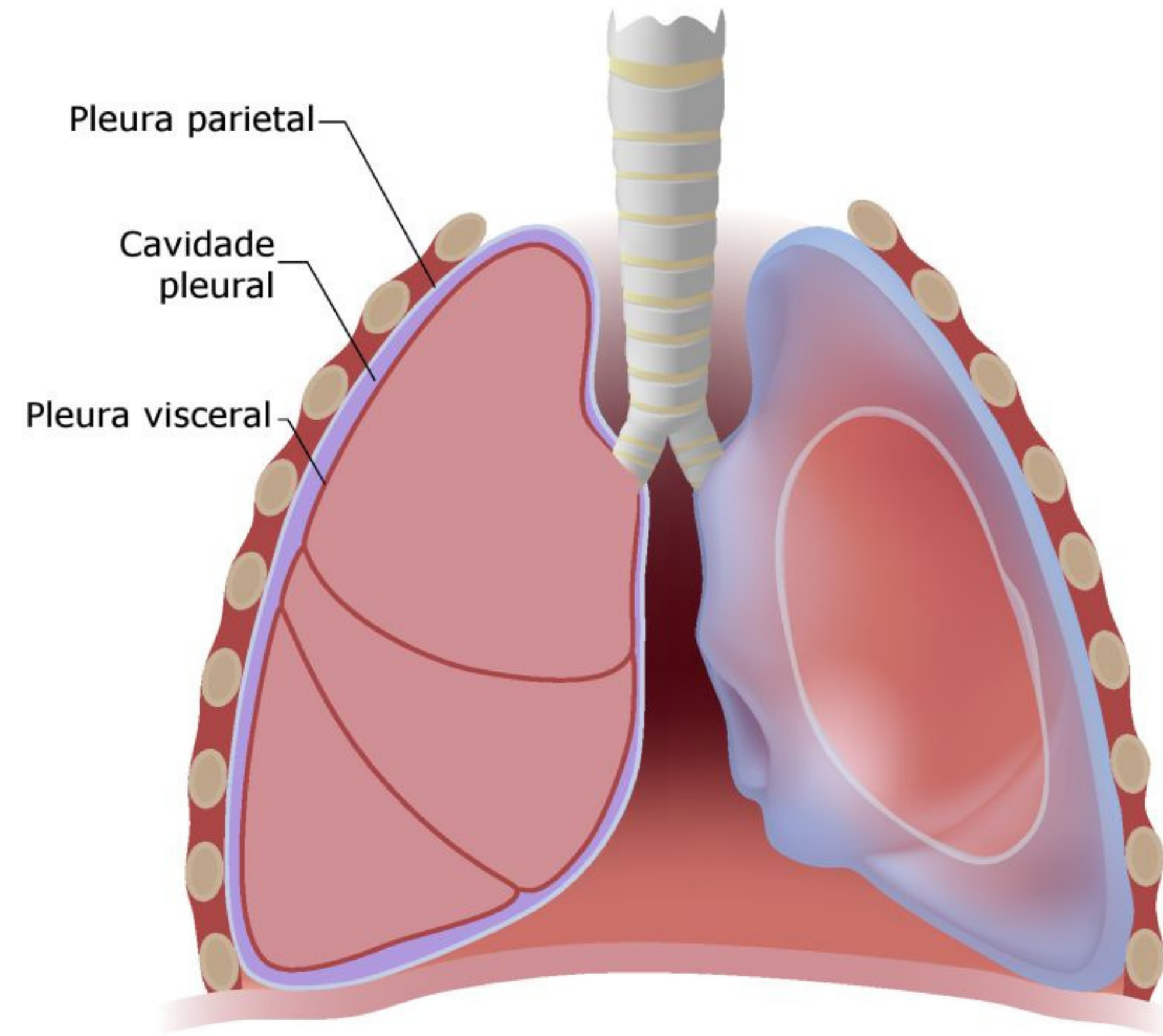


Pressão pleural e pulmonar





Aumento da pressão pleural



- Lesão na parede torácica ou parênquima pulmonar
- Acúmulo de ar no espaço pleural (pneumotórax)
- Acúmulo de fluido no espaço pleural (efusão)
- Perda da pressão negativa
- Prejudica a expansão pulmonar
- Compromete o retorno venoso e a função cardíaca (se hipertensivo)



Volumes e capacidades pulmonares

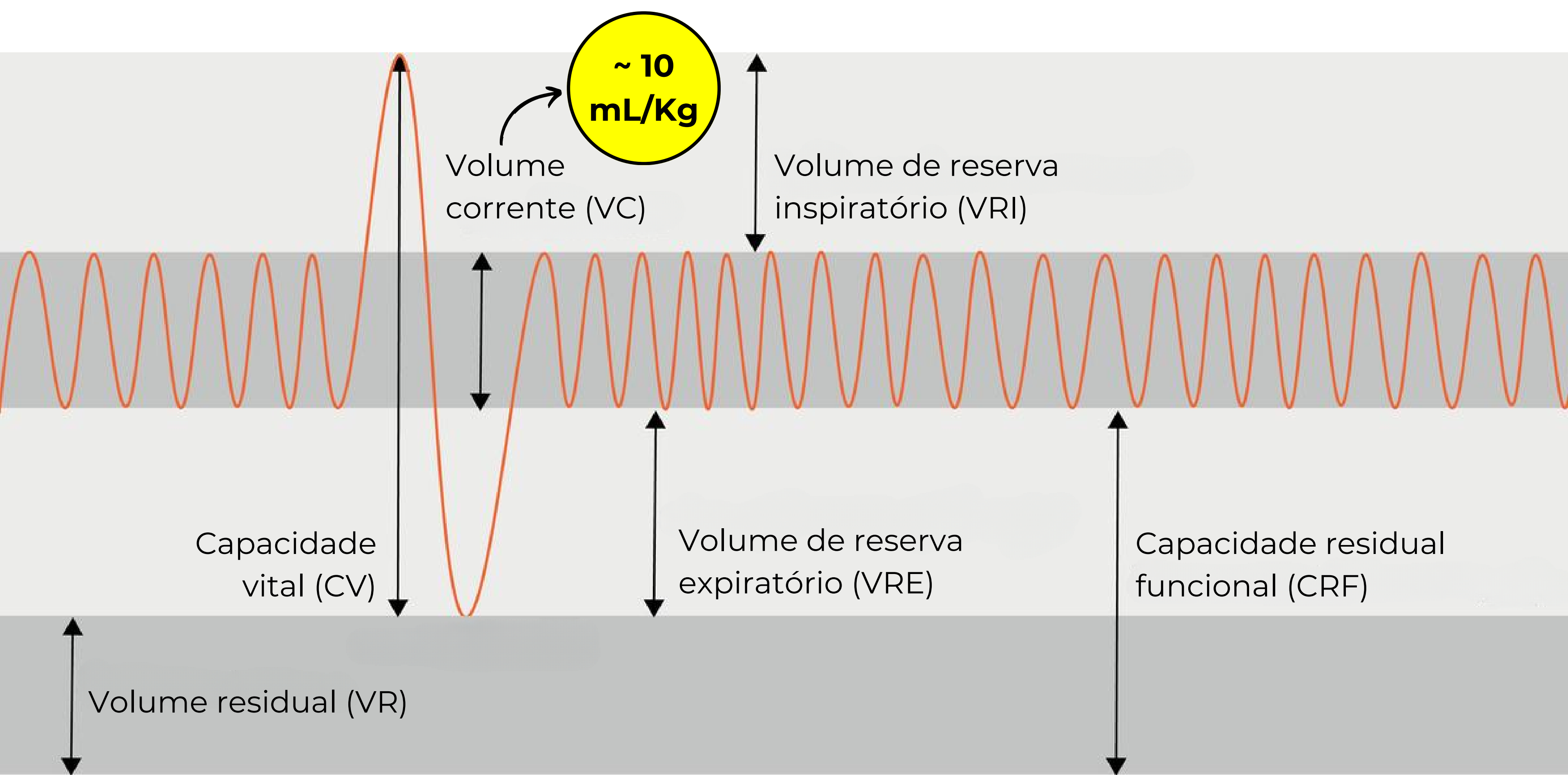


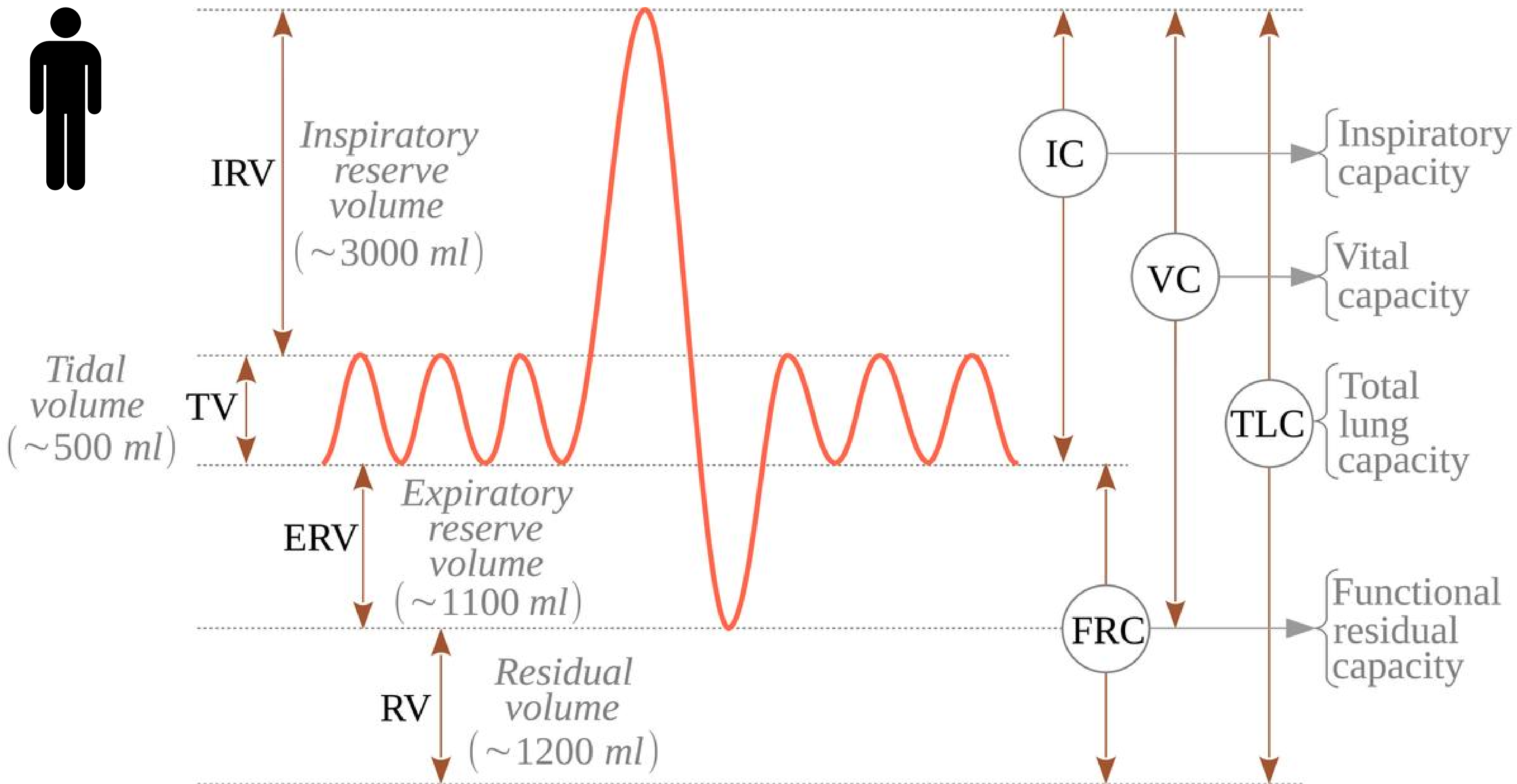
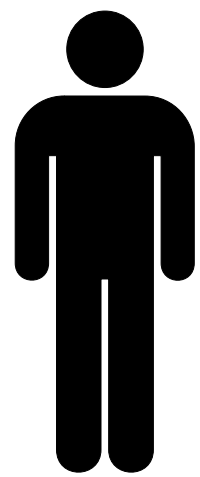
- Volume corrente (VC, TV ou VT)
- Volume de reserva inspiratório (VRI)
- Volume de reserva expiratório (VRE)



- Volume residual (VR)
- Capacidade pulmonar total (CPT)
- Capacidade vital (CV)
- Capacidade inspiratória (CI)
- Capacidade residual funcional (CRF)







LUNG VOLUMES AND CAPACITIES

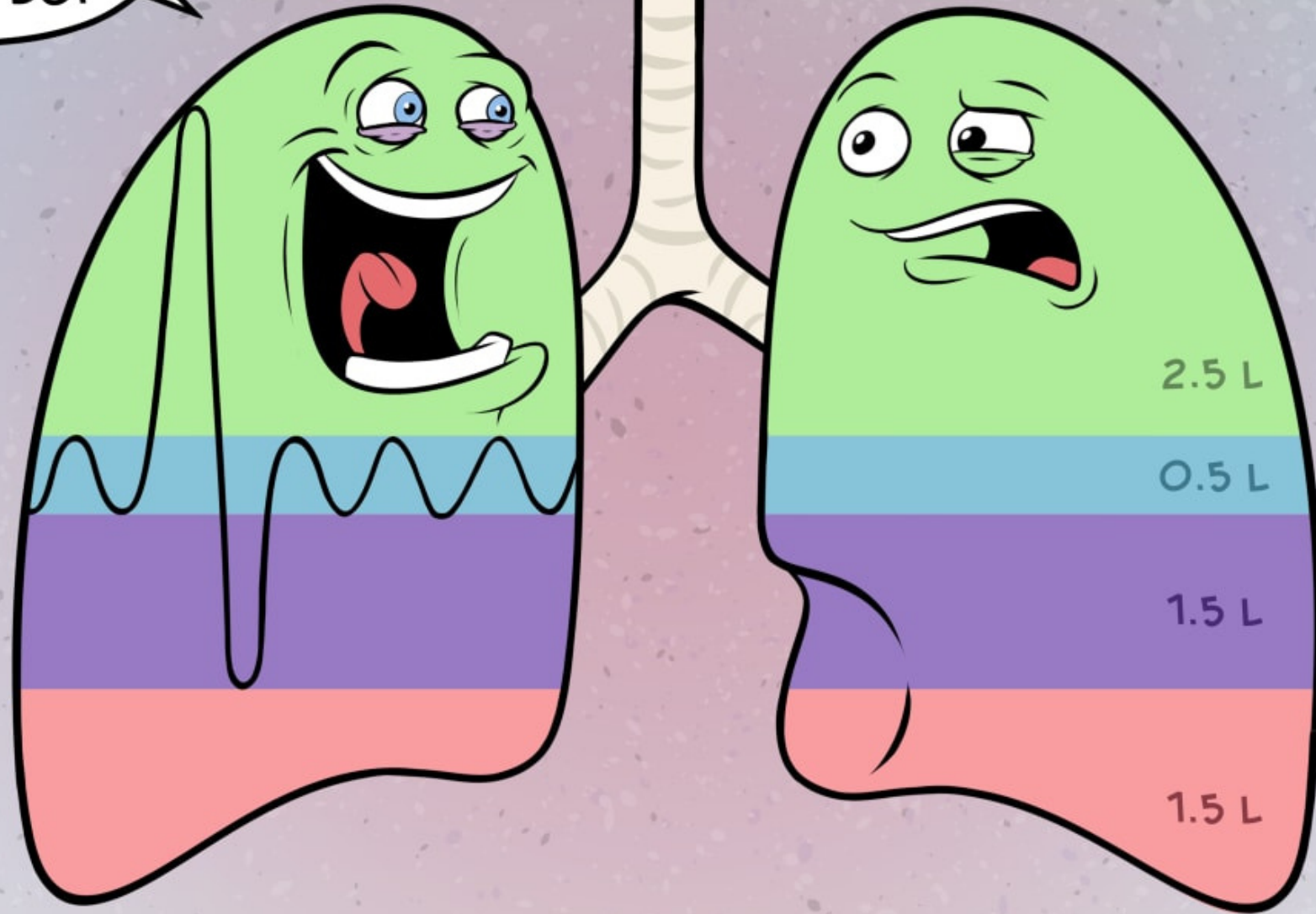
IRV
INSPIRATORY
RESERVE VOLUME

V_T
TIDAL VOLUME

ERV
EXPIRATORY
RESERVE VOLUME

RV
RESIDUAL VOLUME

LOOK WHAT
I CAN DO!



IC
INSPIRATORY
CAPACITY

FRC
FUNCTIONAL
RESIDUAL CAPACITY

VC
VITAL CAPACITY

TLC
TOTAL LUNG
CAPACITY



IRV



V_T



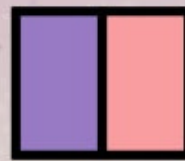
ERV



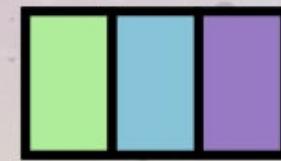
RV



IC



FRC



VC



TLC

Volume Minuto (VM) respiratório



Quantidade de ar que entra e sai dos pulmões

POR MINUTO

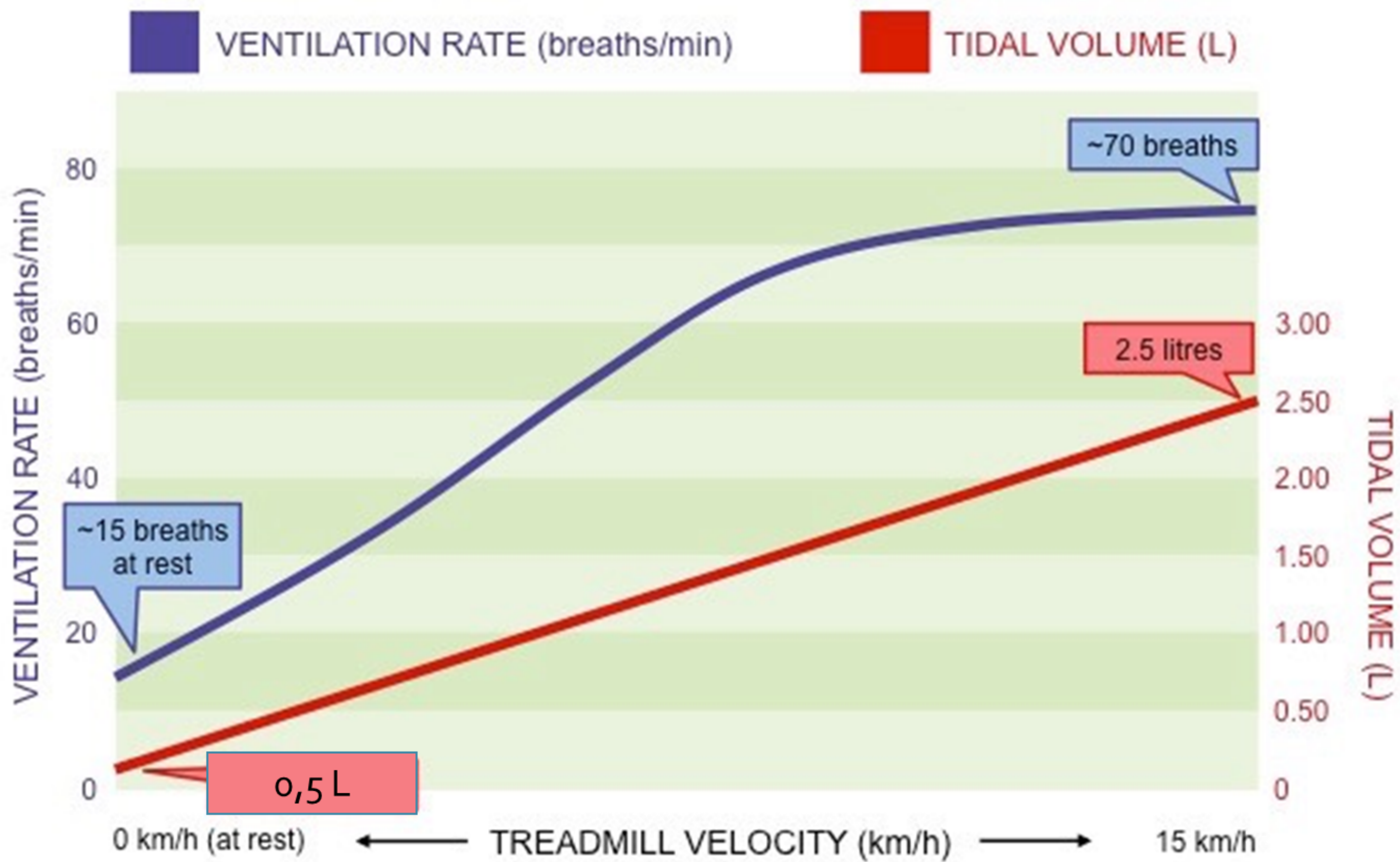
$$VM = VC \times f$$



É o principal determinante da

VENTILAÇÃO PULMONAR





Tensão superficial e surfactantes

Tendência ao colapamento alveolar

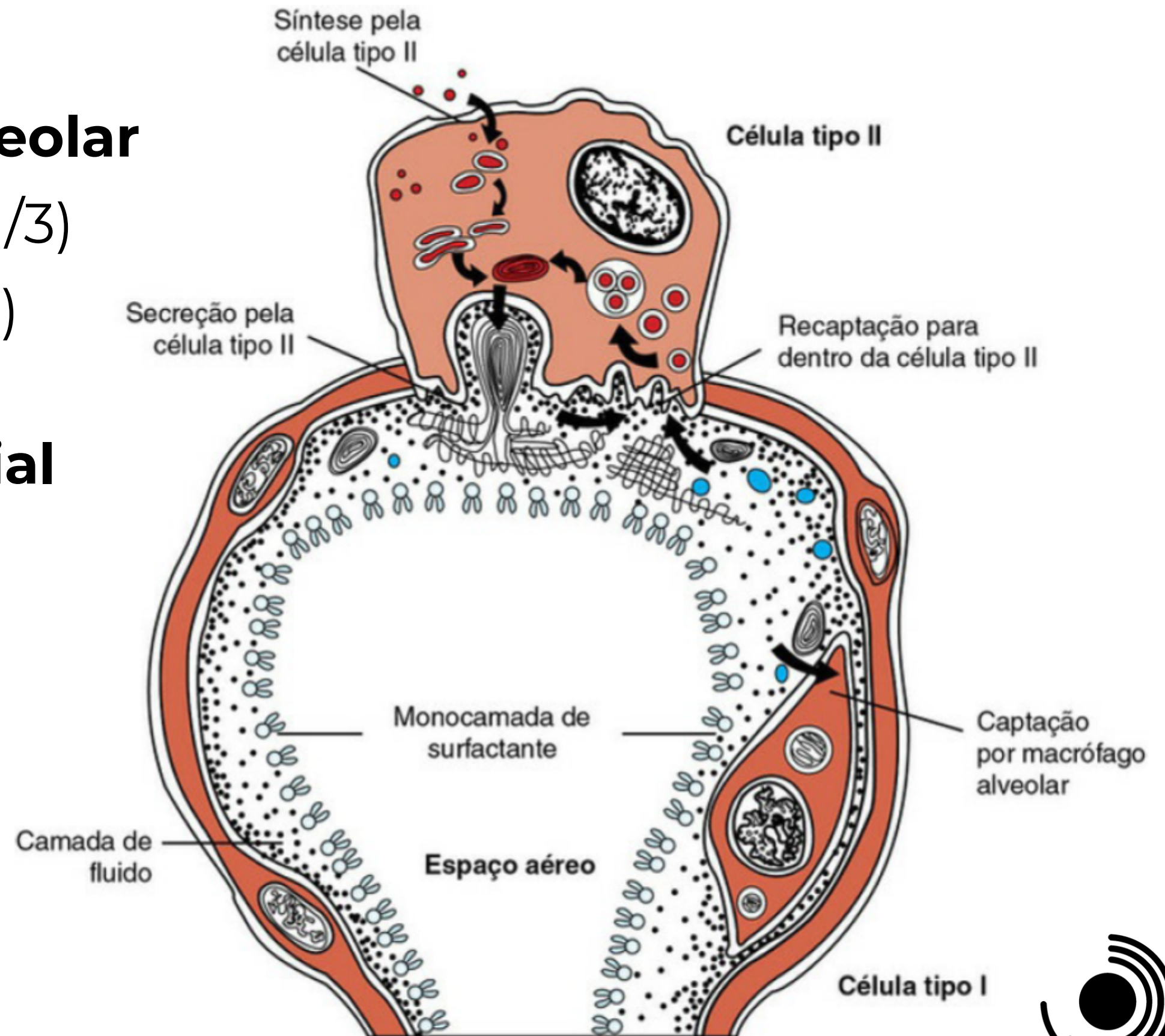
- Retração de fibras elásticas (1/3)
- Tensão superficial (água) (2/3)

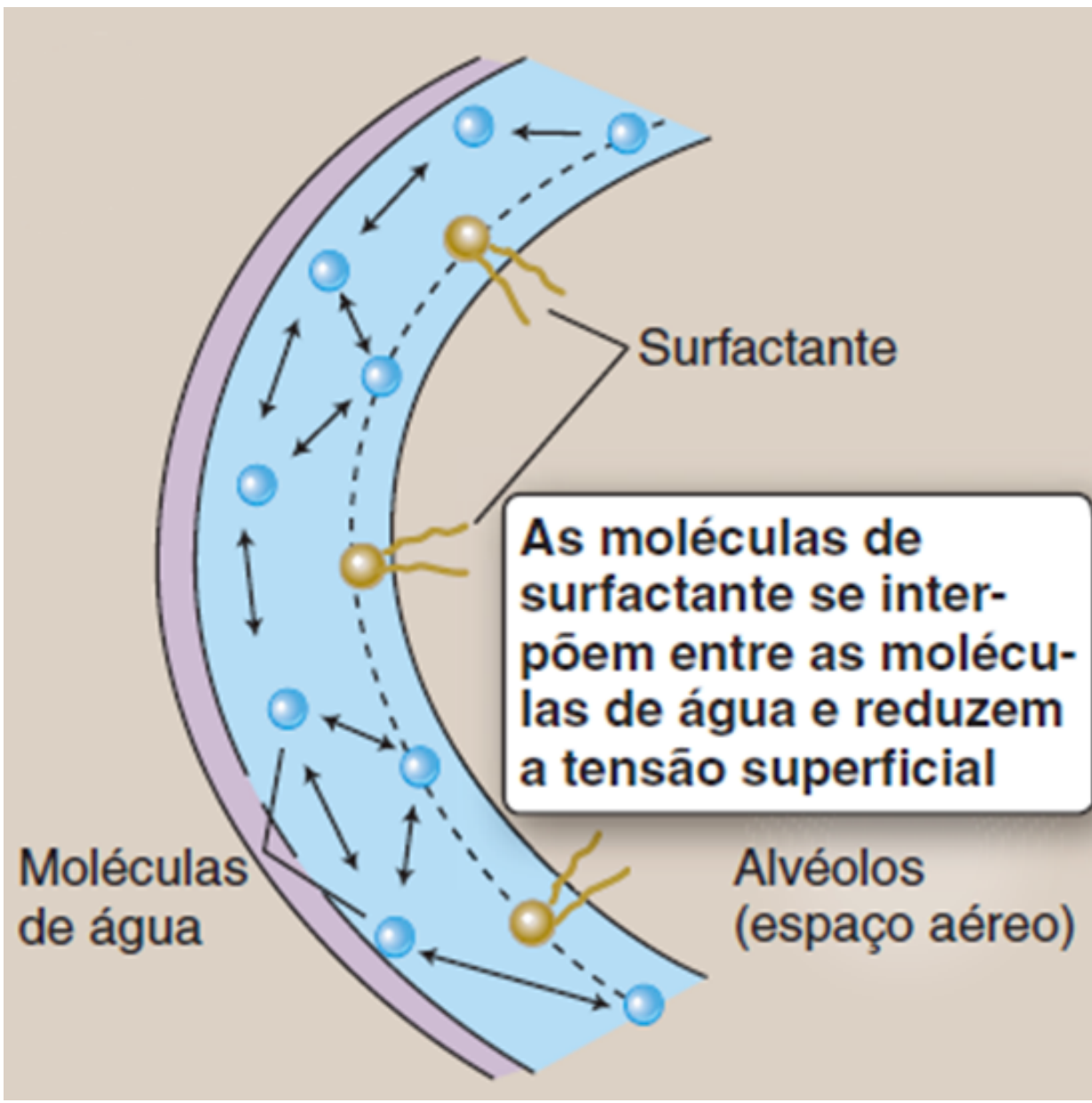
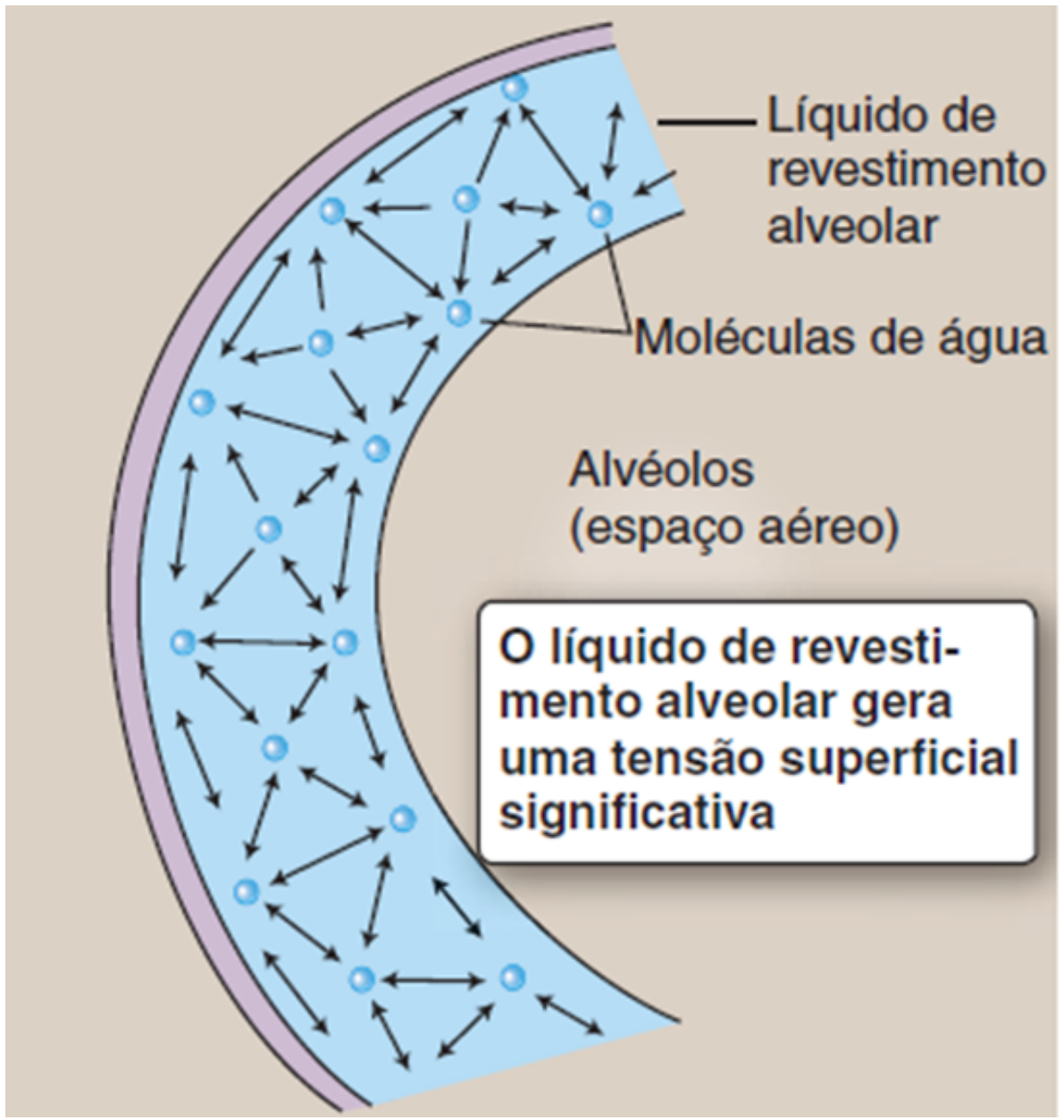
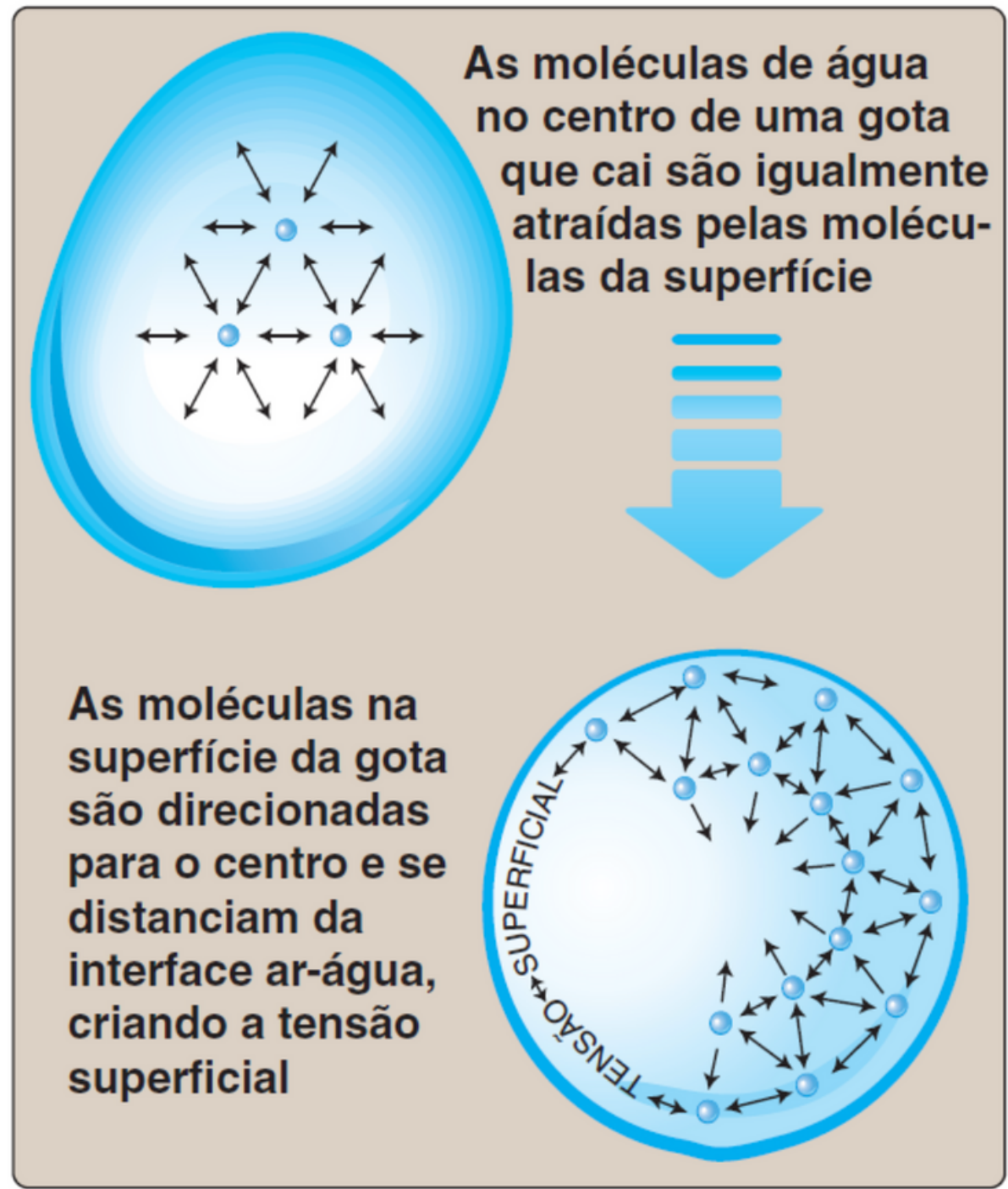
Surfactantes ↓ tensão superficial

- Pneumócito tipo II

Volume Residual (VR)

- Contribui para ↓ o colapso

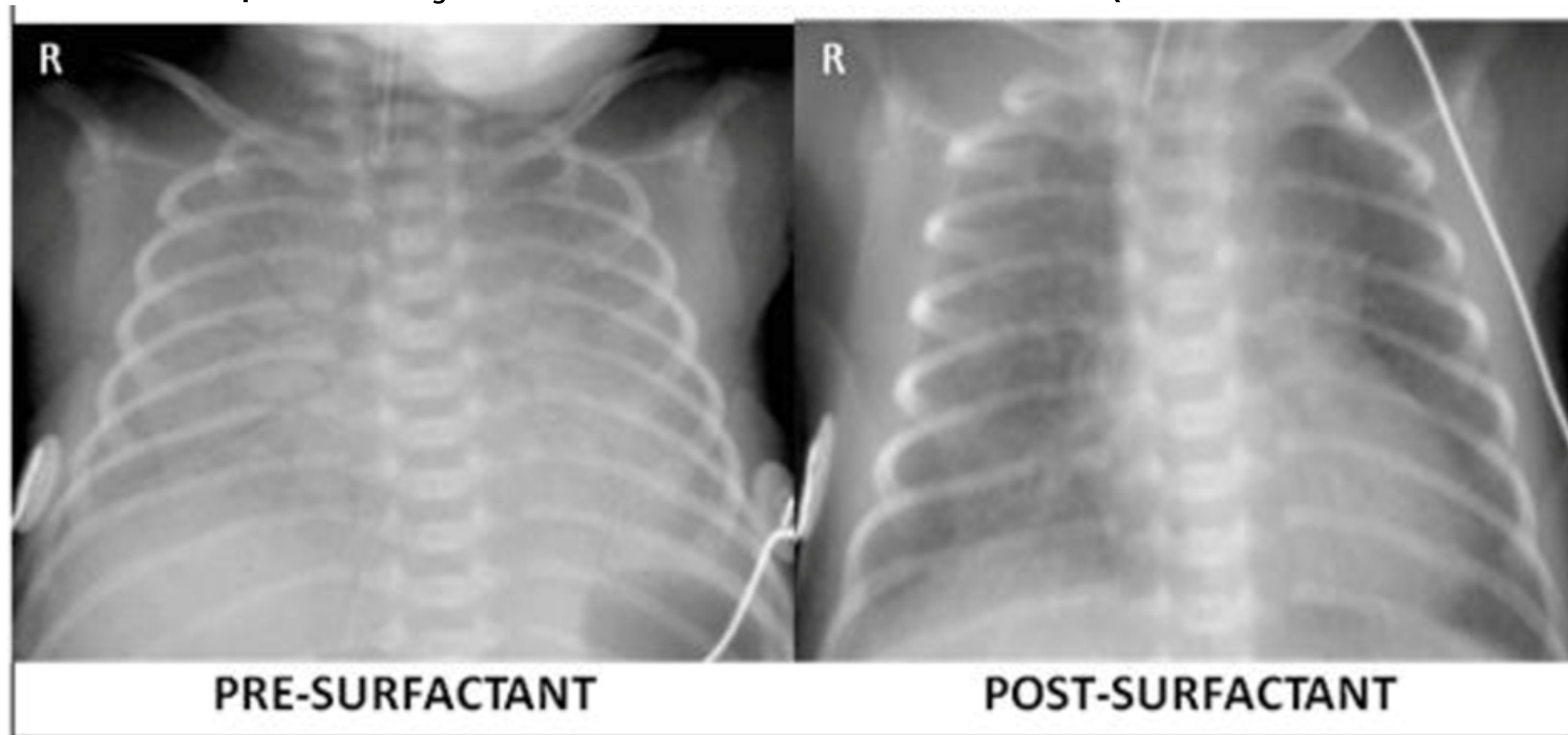




O surfactante...

Produzido na vida fetal

- Metade do período gestacional
- Suficiência no final da gestação
- Depende da produção de cortisol no feto (maturidade adrenal)



Complacência pulmonar

- Medida das propriedades elásticas (do pulmão)
- Facilidade com a qual há distensão pulmonar
- Variação de volume X variação de pressão



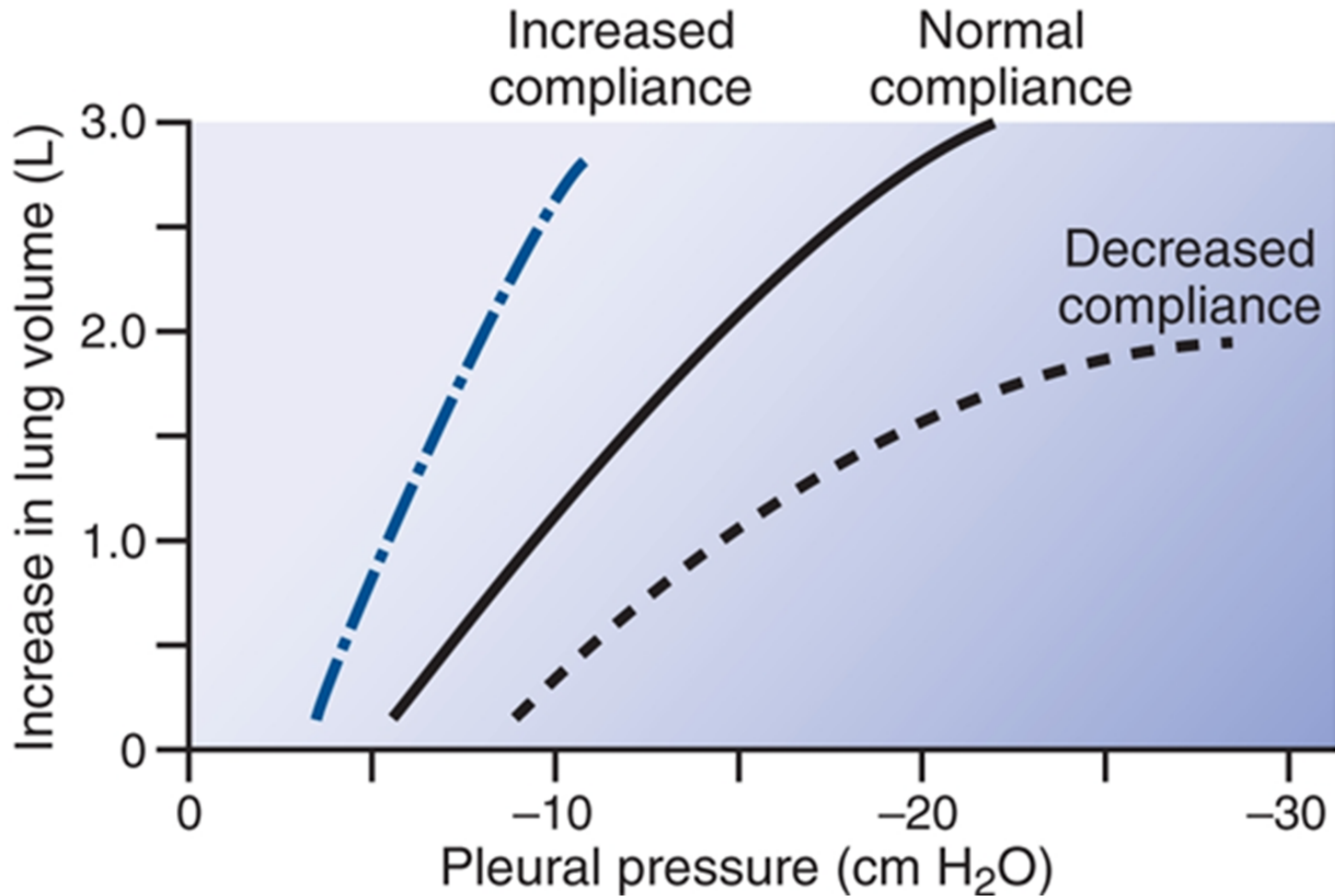
↑ complacência:
pulmão se distende
mais facilmente



↓ complacência:
pulmão não se distende
com facilidade

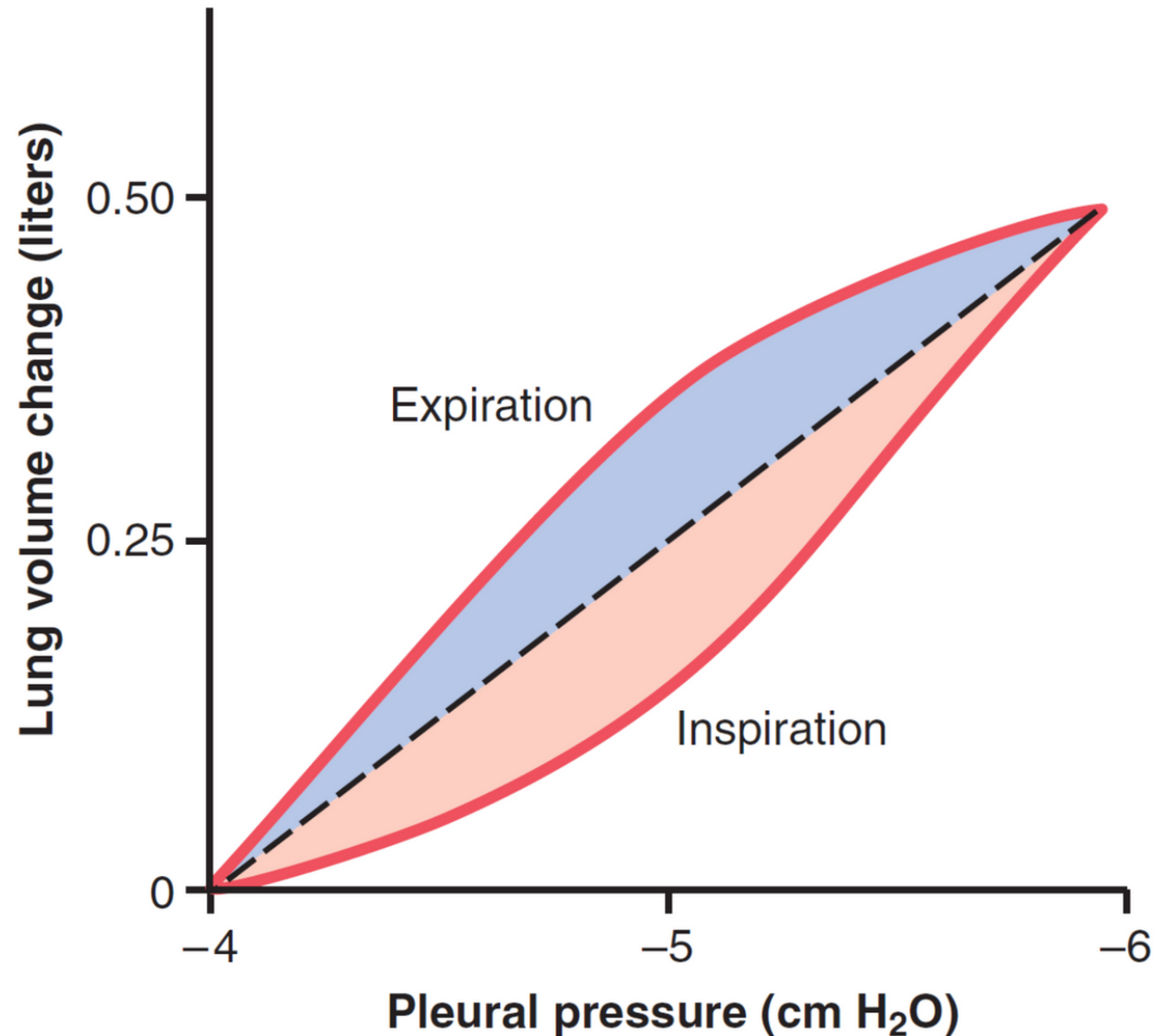


Complacência pulmonar



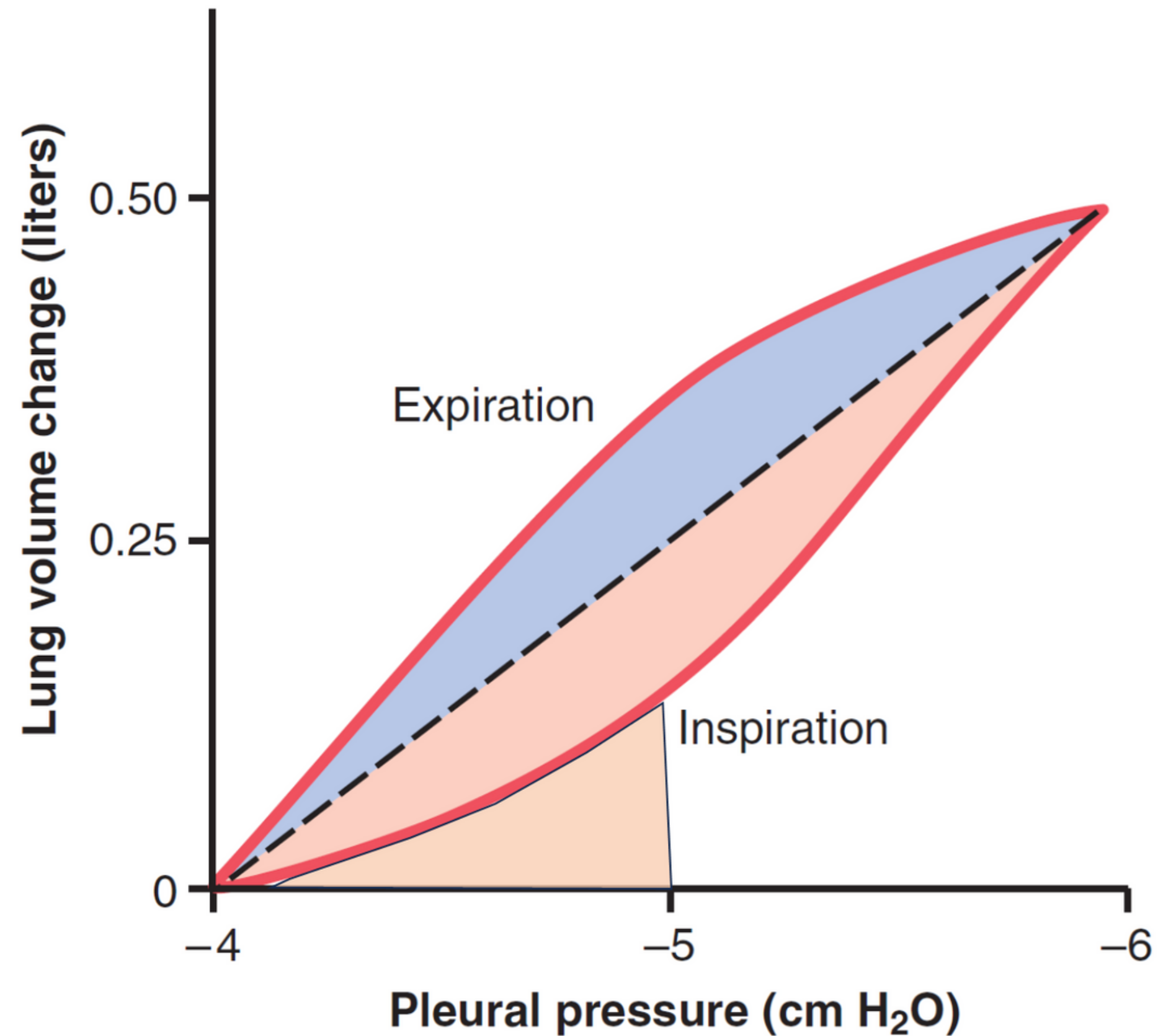
A complacência pulmonar é dinâmica!

Muda ao longo do ciclo respiratório



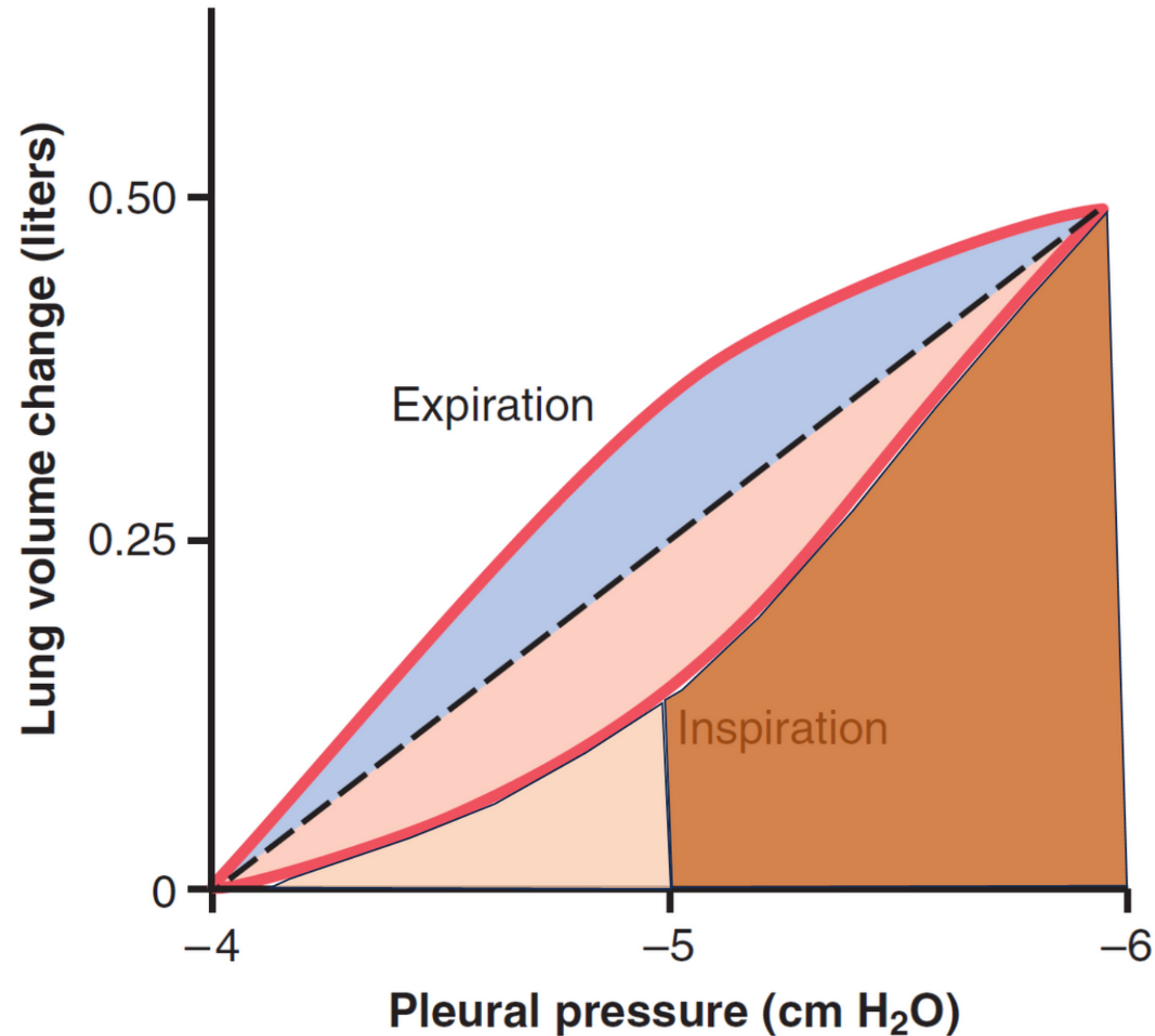
A complacência pulmonar é dinâmica!

Muda ao longo do ciclo respiratório



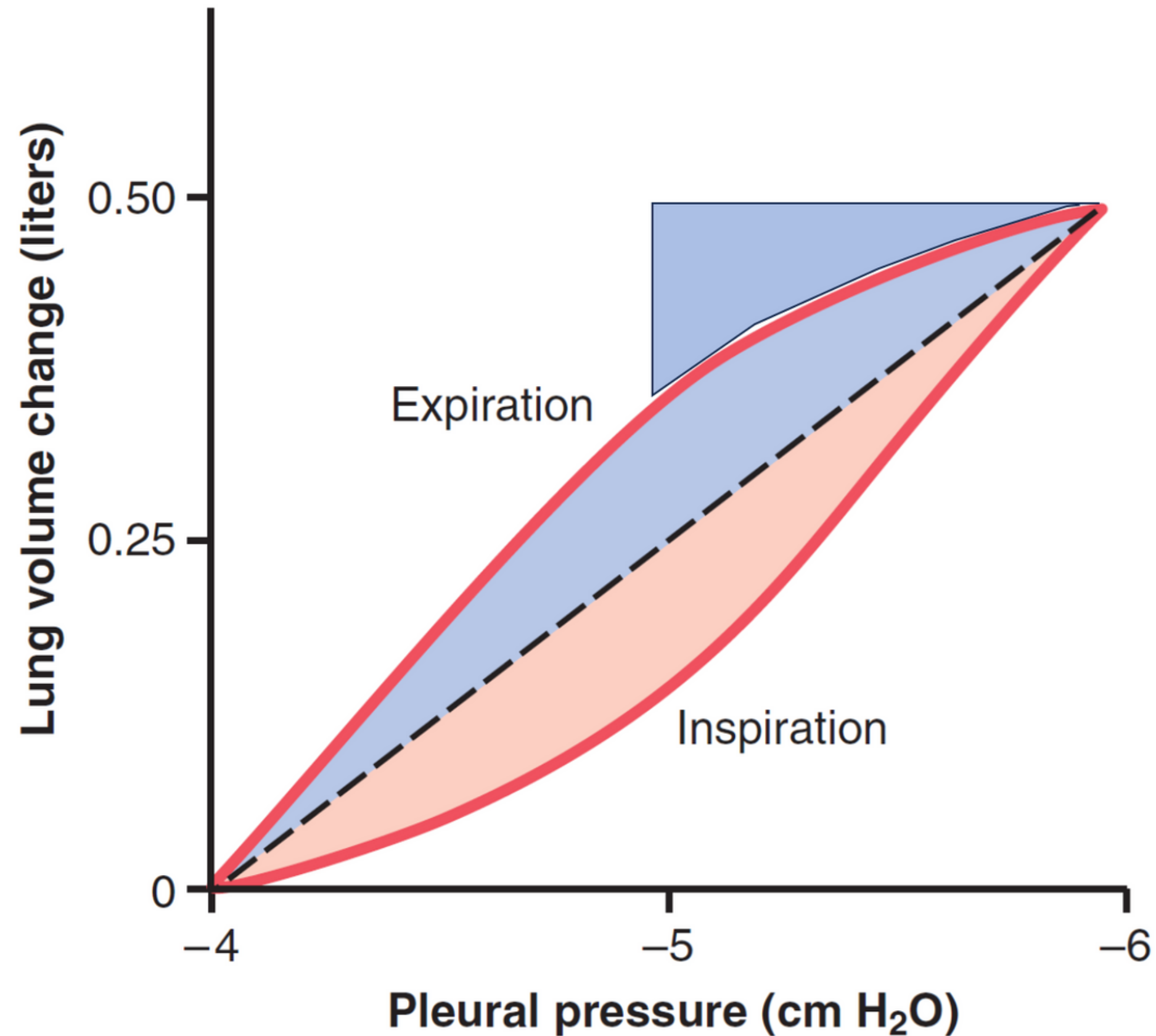
A complacência pulmonar é dinâmica!

Muda ao longo do ciclo respiratório



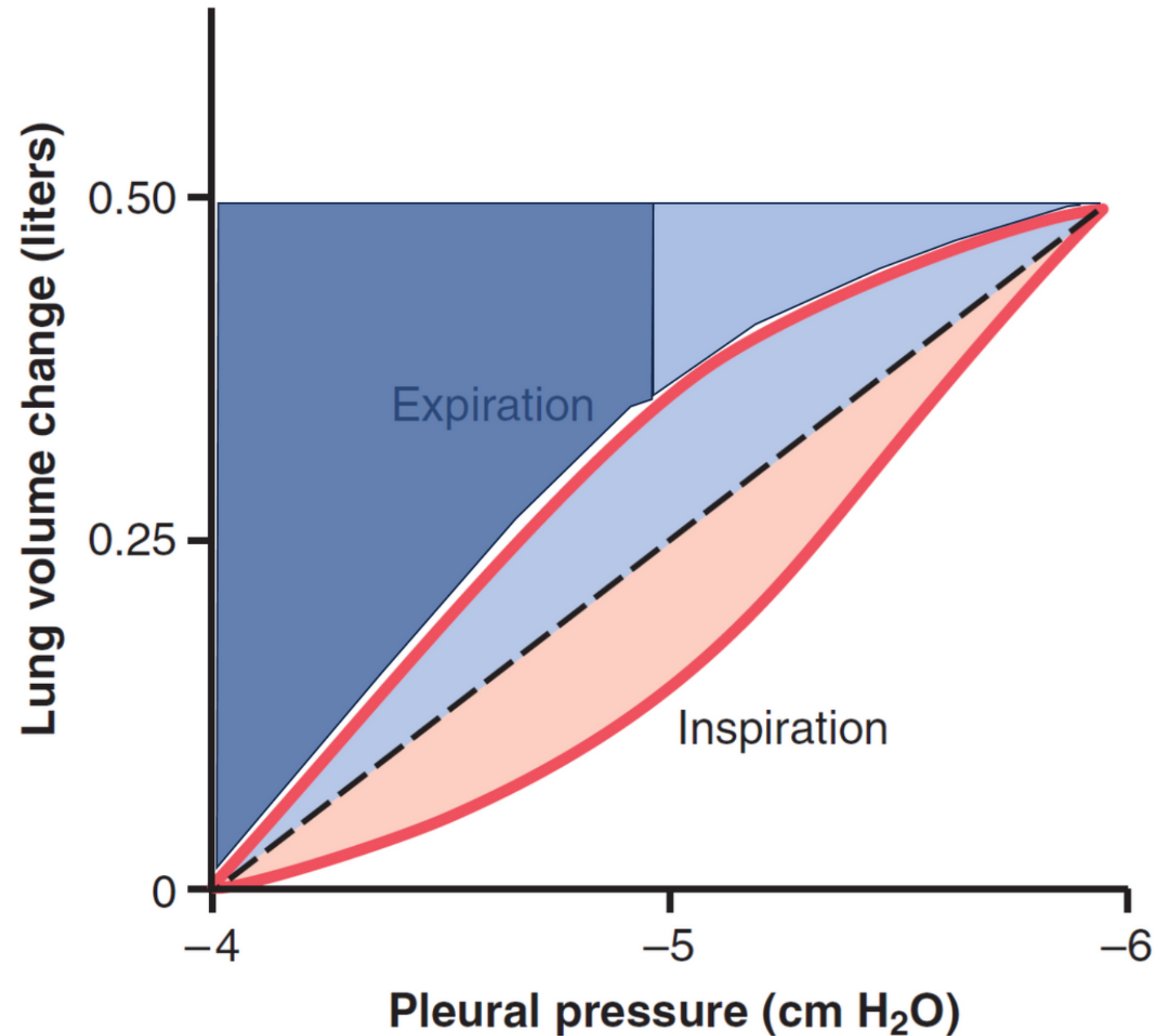
A complacência pulmonar é dinâmica!

Muda ao longo do ciclo respiratório



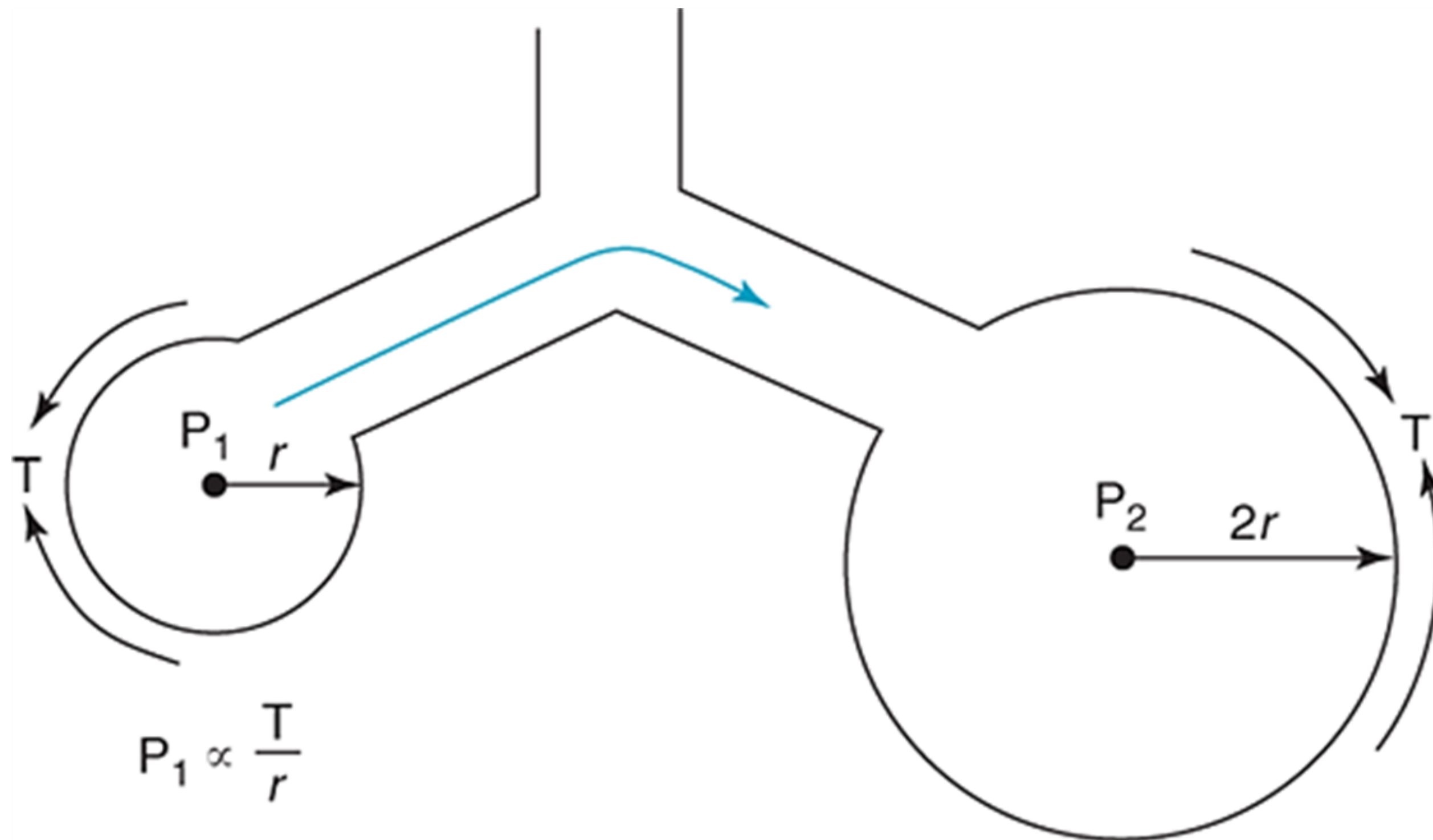
A complacência pulmonar é dinâmica!

Muda ao longo do ciclo respiratório



A complacência pulmonar é dinâmica!

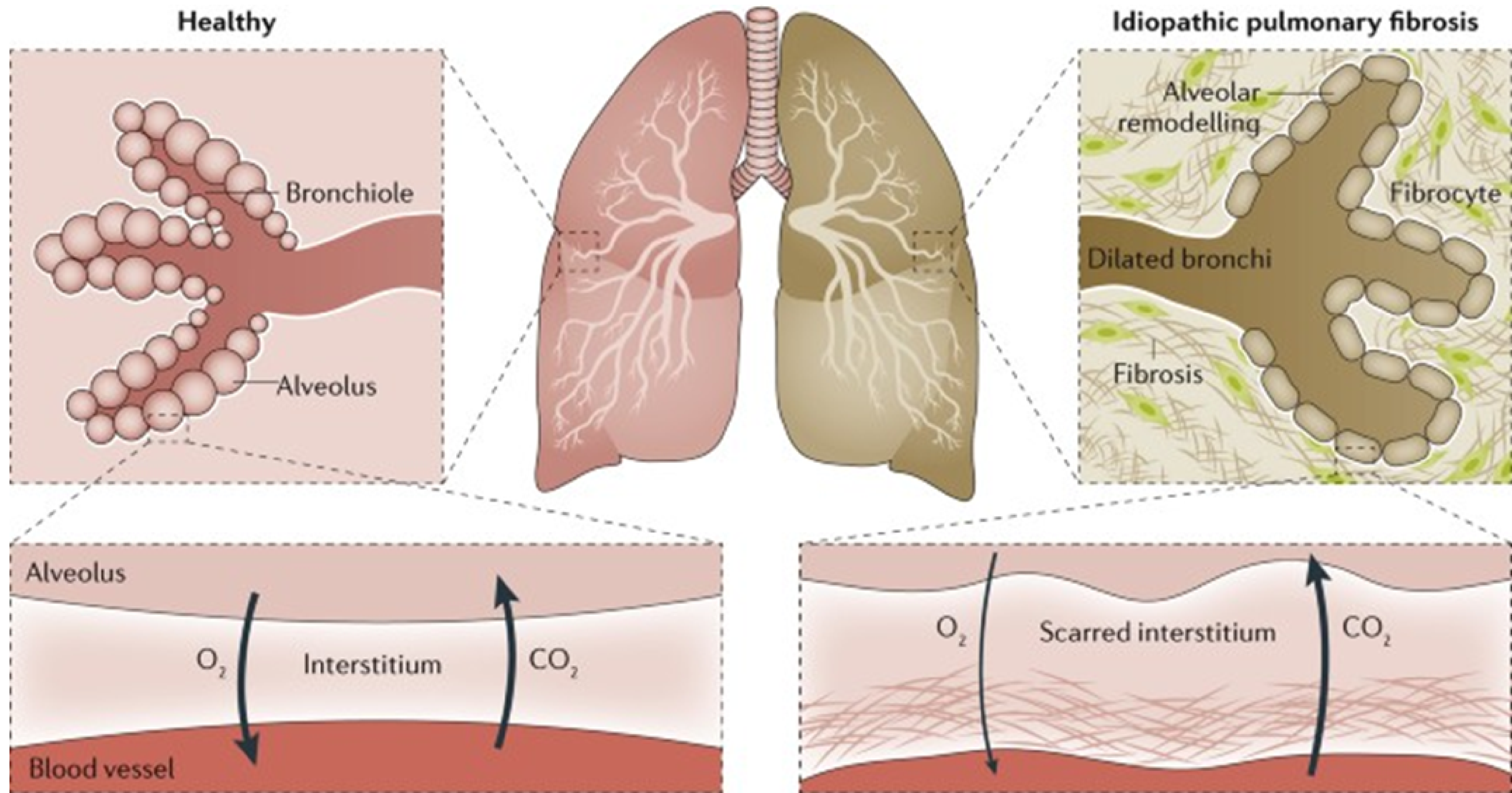
Muda ao longo do ciclo respiratório

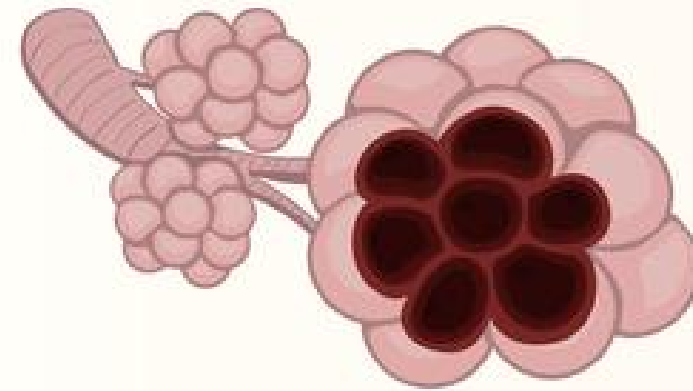
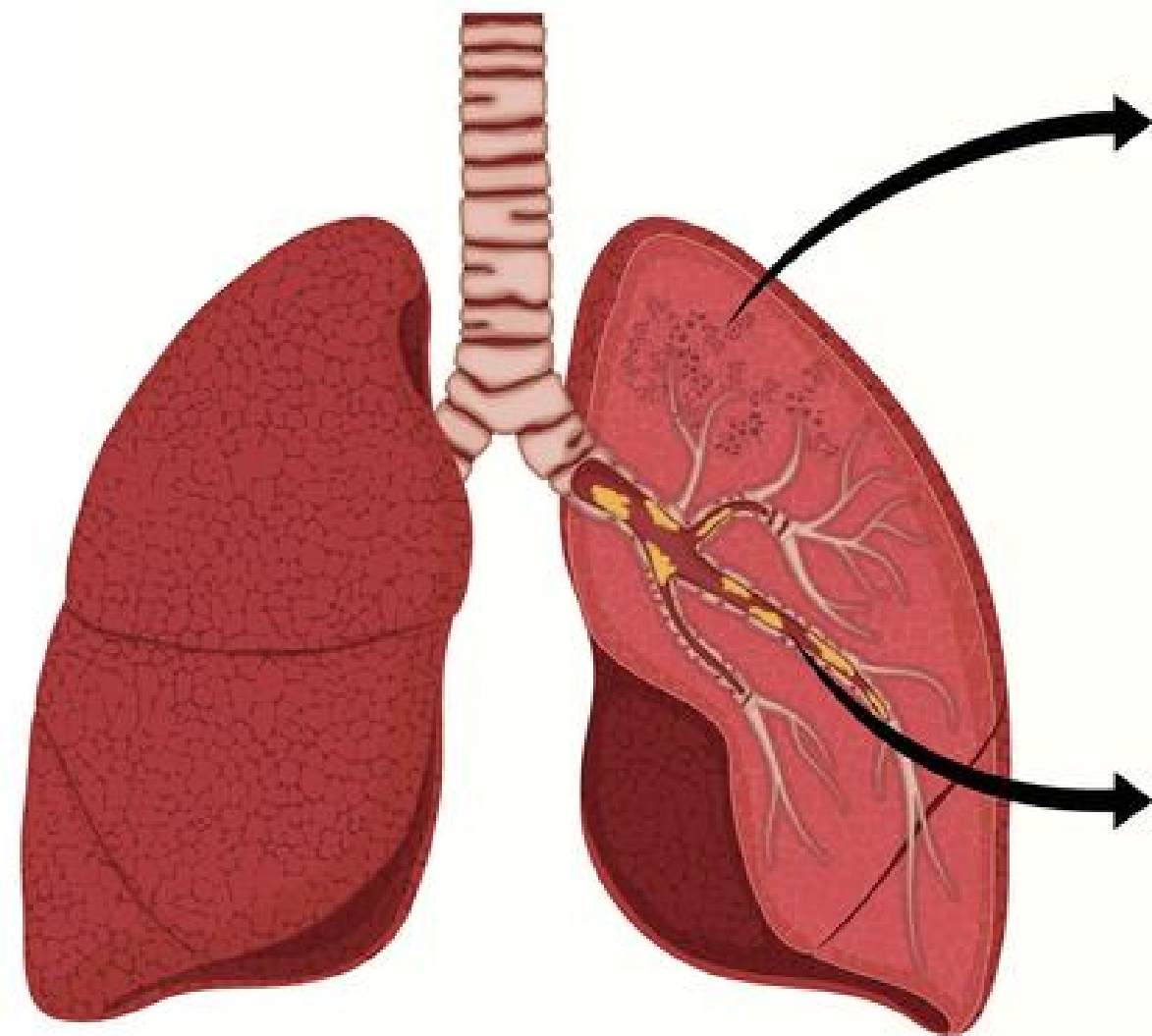


Quanto menor o alvéolo, maior a pressão causada pela tensão superficial.

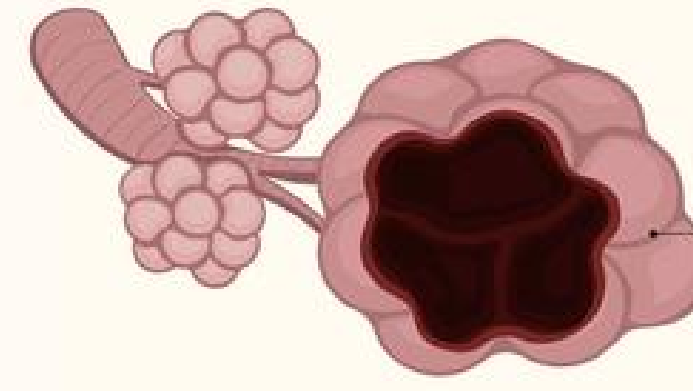
$$P_2 \propto \frac{T}{2r}$$





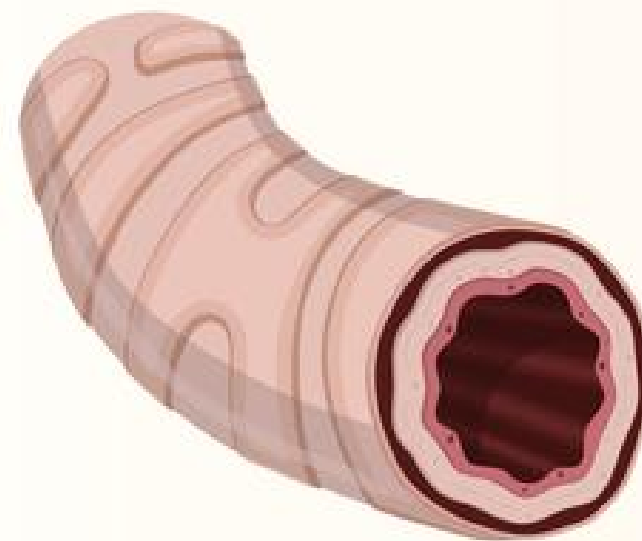


Normal alveoli

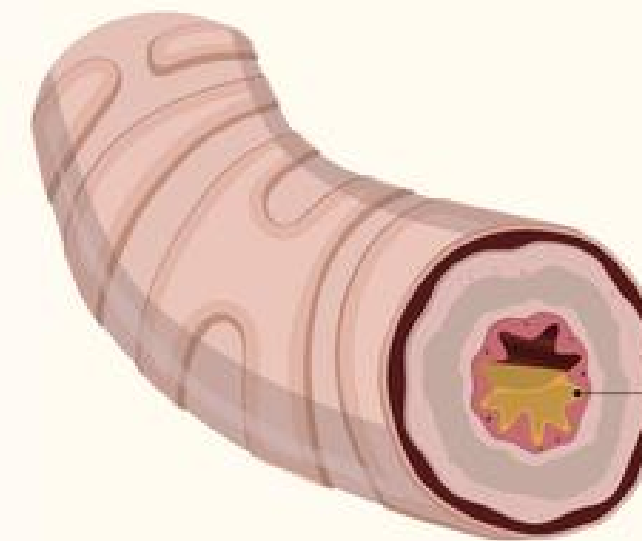


Emphysema

Alveolar membranes
break down



Normal bronchus

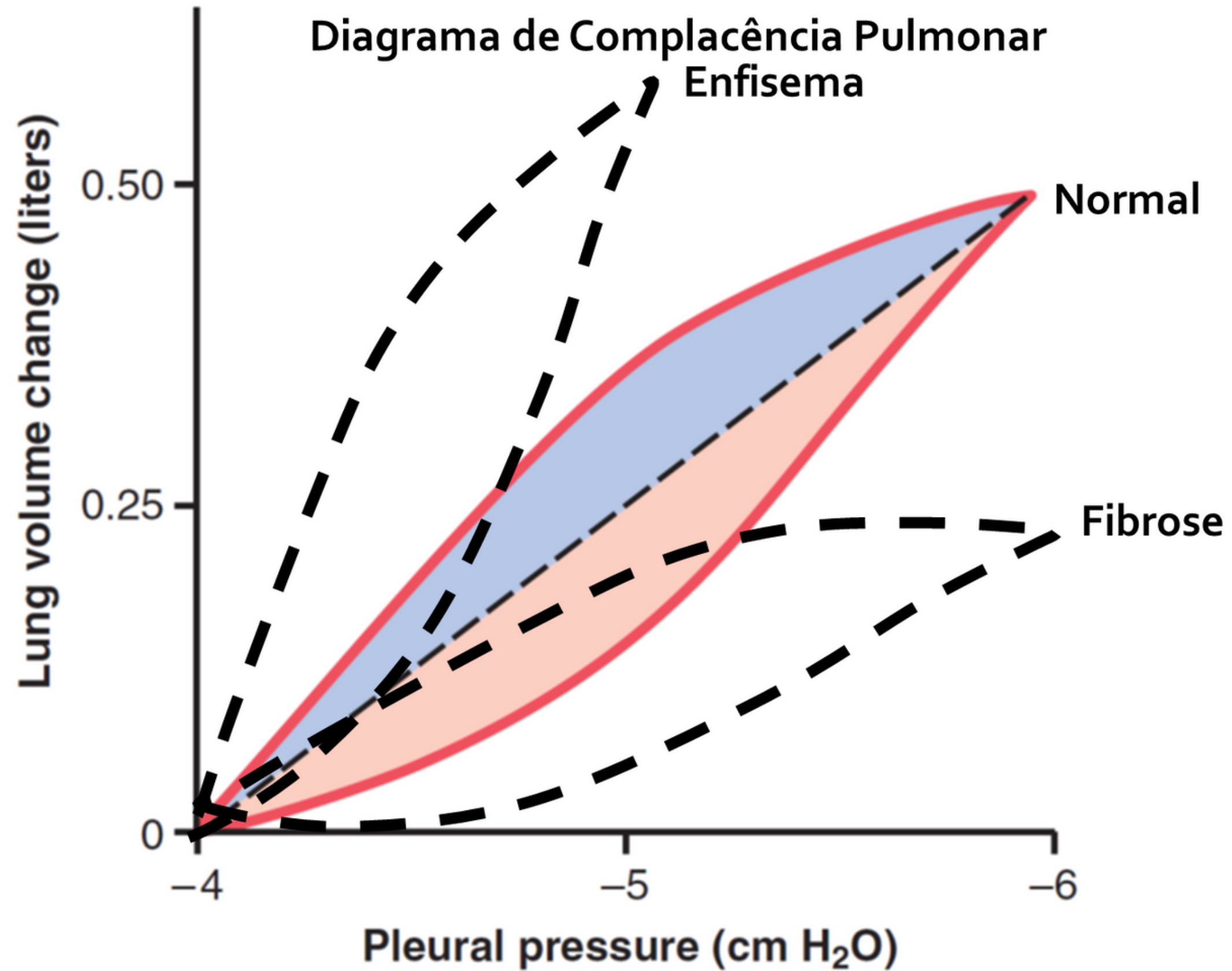


Bronchitis

Inflammation &
excess mucus



Complacência pulmonar



Resistência (das vias aéreas)

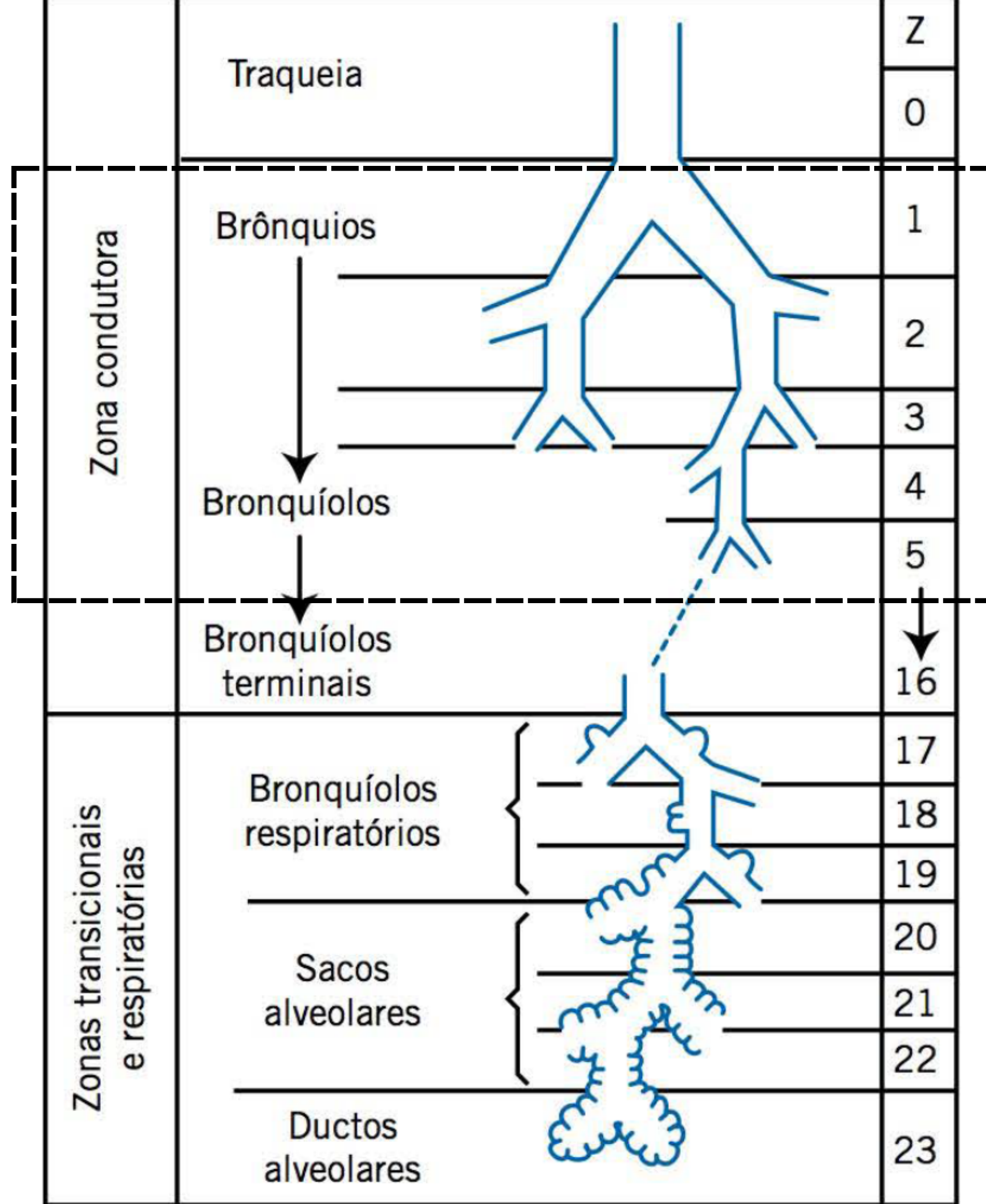
- Resistência ao fluxo de ar
- Inversamente proporcional ao diâmetro da via aérea
- Aumenta com a redução do calibre da via aérea
- Asma, bronquite, corpos estranhos, circuito anestésico, tubo endotraqueal ...

$$R = \frac{8L\eta}{\pi r^4}$$



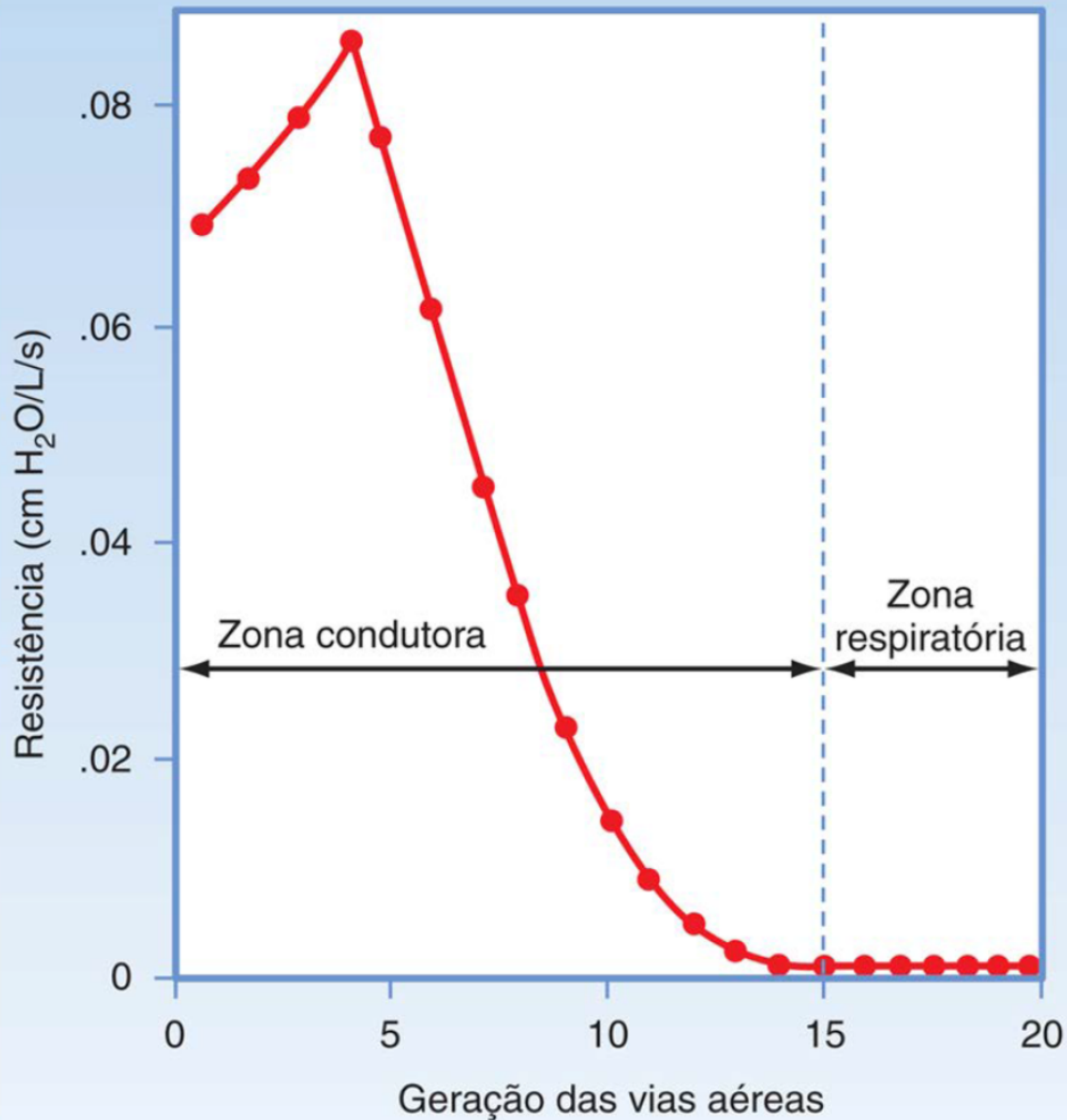
Fluxo de ar **turbulento**
(↑ velocidade)

Fluxo de ar **laminar**
(↓ velocidade)



Principal local de resistência
8 primeiras gerações da árvore brônquica

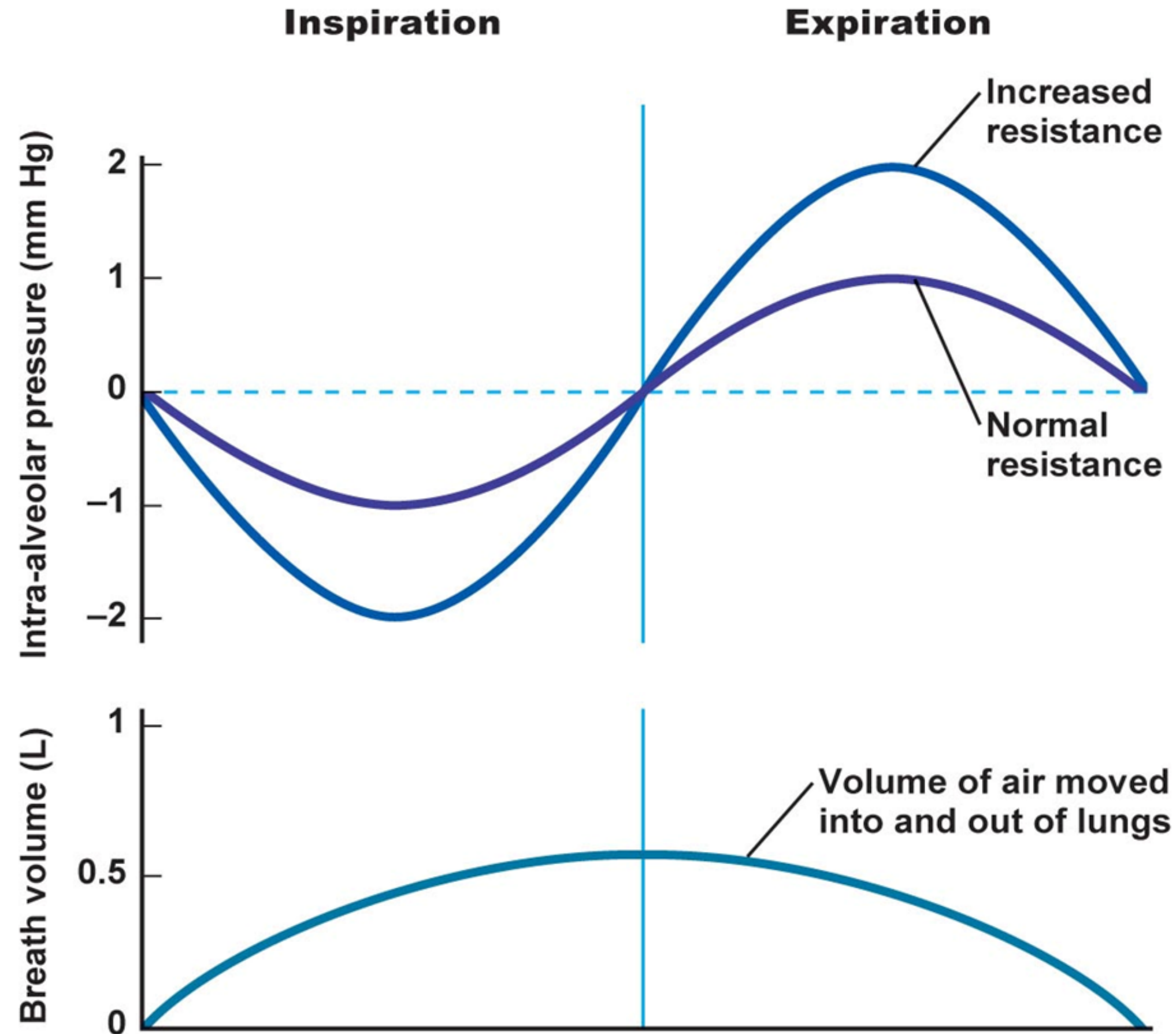




Resistência das vias aéreas em função da geração das vias aéreas. Em um pulmão normal, a maior parte da resistência ao fluxo de ar ocorre nas oito primeiras gerações das vias aéreas.



Impacto da resistência na ventilação pulmonar



Estímulos broncoconstritores

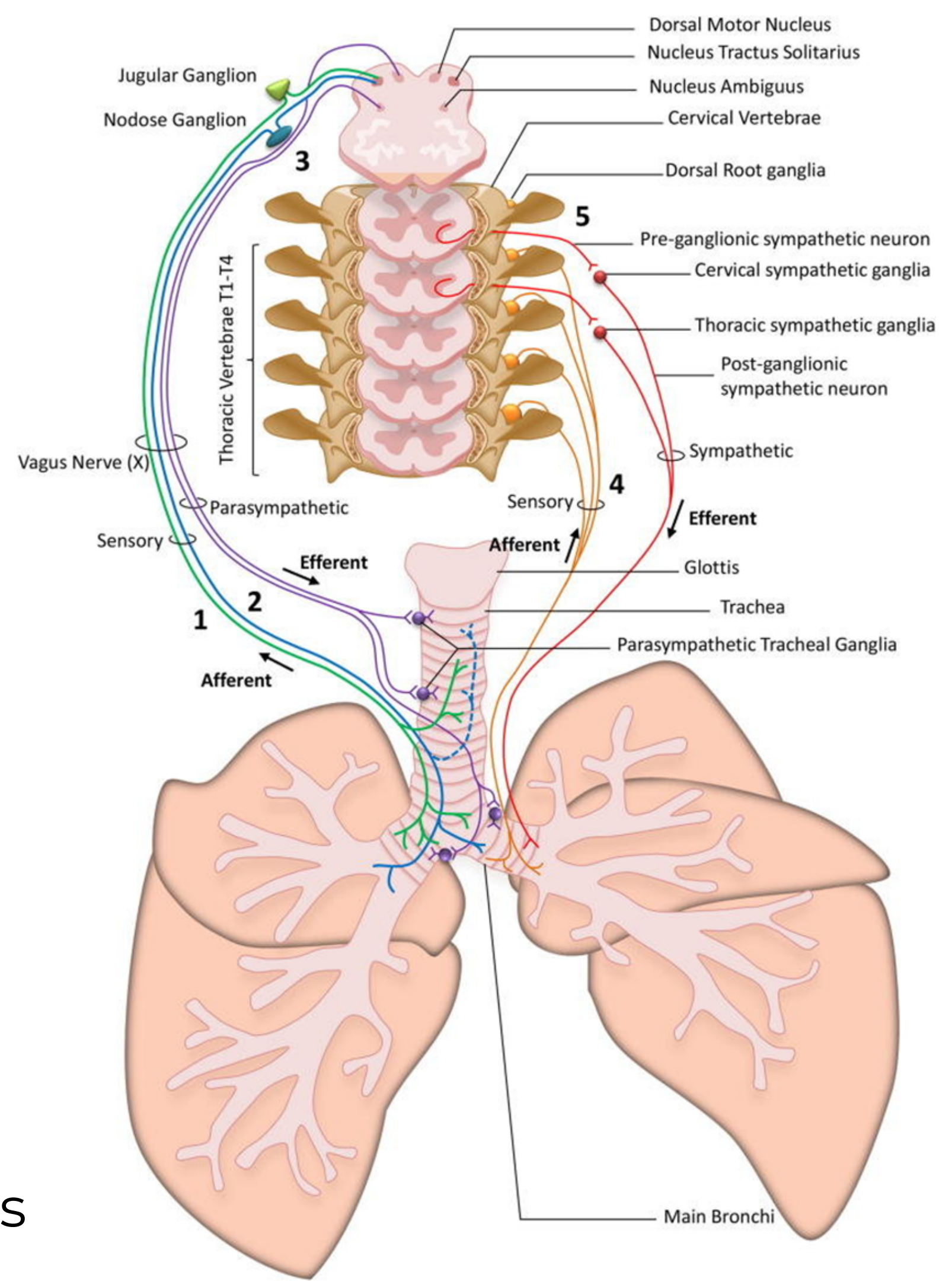
Via vago /
ACh /
Receptor
M3

- Fumaça
- Poeira
- Ar frio
- Outros irritantes
- Histamina
- TxA2 e PGF2 α
- Leucotrienos

Estímulos broncodilatadores

Receptor
 β 2

- Estímulo simpático
- Liberação de catecolaminas



gsk

Seretide[®]

xinafoato de salmeterol
propionato de fluticasona

Spray 25mcg+125mcg/dose

Suspensão aerossol

Uso inalatório por via oral

USO ADULTO E PEDIÁTRICO

ACIMA DE 4 ANOS



Com contador de doses

VENDA SOB PRESCRIÇÃO MÉDICA

Contém: 120 doses
Peso Líq.: 12 g - Conteúdo: 8 mL

MSD

Singulair[®]

MONTELUKAST

USO PEDIÁTRICO

Tabletas Masticables.
Caja con 20 Tabletas Masticables

5 mg



NDC 49502-500-02
Rx only:

EPIPEN 2-PAK[®]

(Epinephrine) Auto-Injectors 0.3 mg

Each carton contains: Two yellow EpiPen[®] Auto-Injectors
One grey Trainer



1293AA01 DIN 028
1mL EPINEPHRINE USP 1 mg/mL
(Adrenalin/ Adrenaline 1 mg/mL V/S.C.
Dosage: see package insert
Alveda Pharmaceutical
Toronto, ON M4S 3C3

NO MEDICINE NO NEEDLE
TRAINER
FOR PRACTICE ONLY

- 1 Pull off cap and push tip against thigh.
- 2 Swing and thrust tip against thigh so cover thigh so. HOLD on thigh for 10 seconds to ensure drug delivery.
- 3 Tip extends after use.



Ventilação (\dot{V}), perfusão (\dot{Q}) e relação \dot{V}/\dot{Q}

Ventilação = volume minuto e sua chegada aos alvéolos

Perfusão = fluxo sanguíneo e sua chegada aos alvéolos

Alvéolos perfundidos e ventilados (aerados)
= trocas gasosas OK

Alvéolos **não-perfundidos**, mas ventilados (aerados)
= **espaço morto fisiológico**

Alvéolos perfundidos, mas **não-ventilados (aerados)**
= **shunt pulmonar** → **hipoxemia**

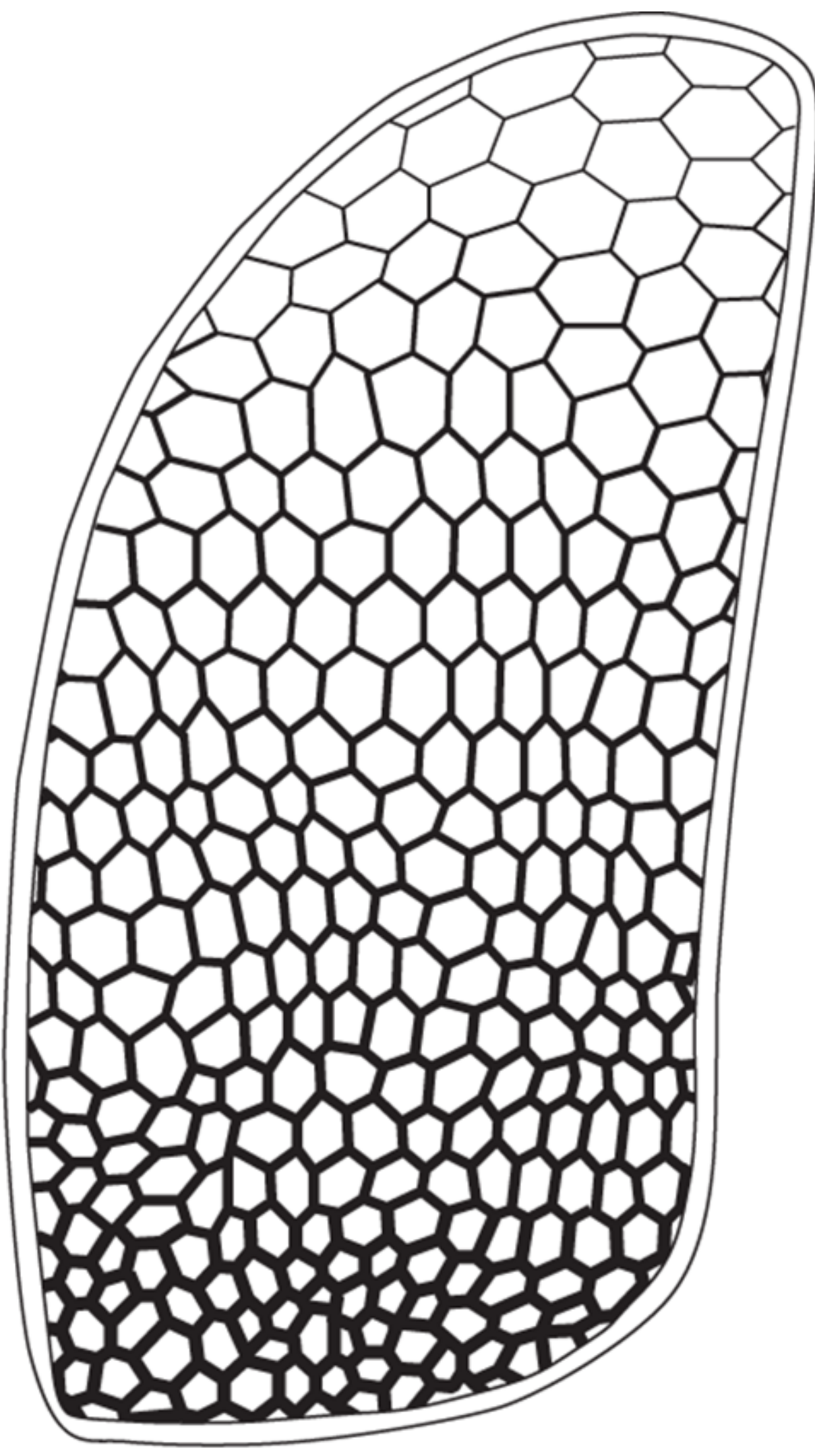


Distribuição da ventilação e perfusão pulmonar

Não é homogênea

- Os alvéolos próximos ao ápice pulmonar são mais distendidos
- Os alvéolos mais próximos à base são menos expandidos, porém mais complacentes
- O fluxo sanguíneo aumenta do ápice para a base

Influência da gravidade



No ápice do pulmão, os alvéolos são forçados a insuflar pelo peso dos tecidos pulmonares abaixo

$$P_A = 0 \text{ cm H}_2\text{O}$$

$$P_{pl} = -10 \text{ cm H}_2\text{O}$$

Espaço pleural

Parede torácica

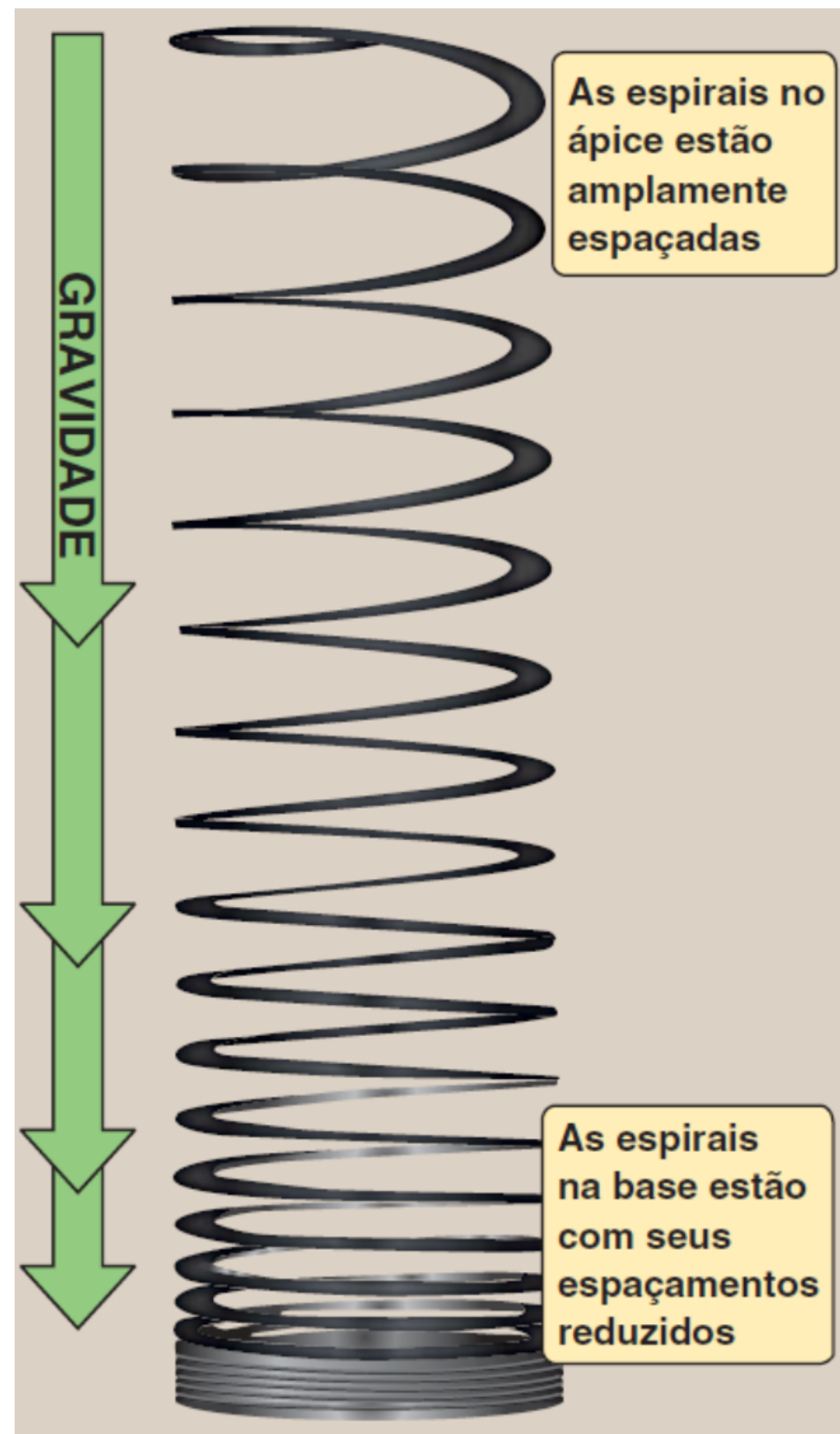
-5

-2

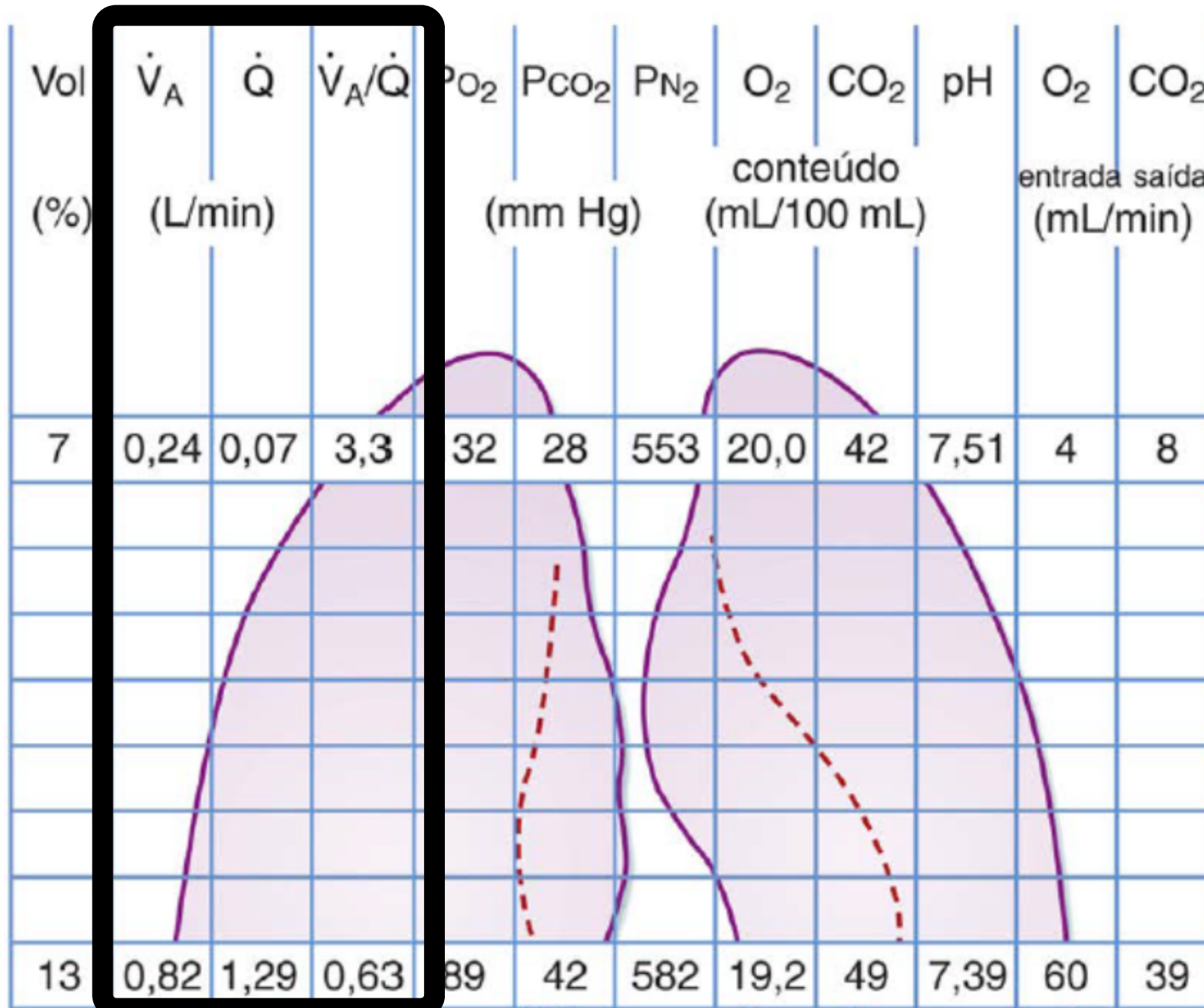
0

Na base do pulmão, os alvéolos são comprimidos pelo peso dos tecidos acima

A massa pulmonar empurra para fora, comprimindo a pleura; a P_{pl} aumenta



Relações Ventilação/Perfusão



v/Q normal (médio) ~ 0,8



Zonas de West

Zona 1

$$V/Q > 1$$

$$P_A > P_a > P_v$$

Zona 2

$$V/Q \sim 1$$

$$P_a > P_A > P_v$$

Zona 3

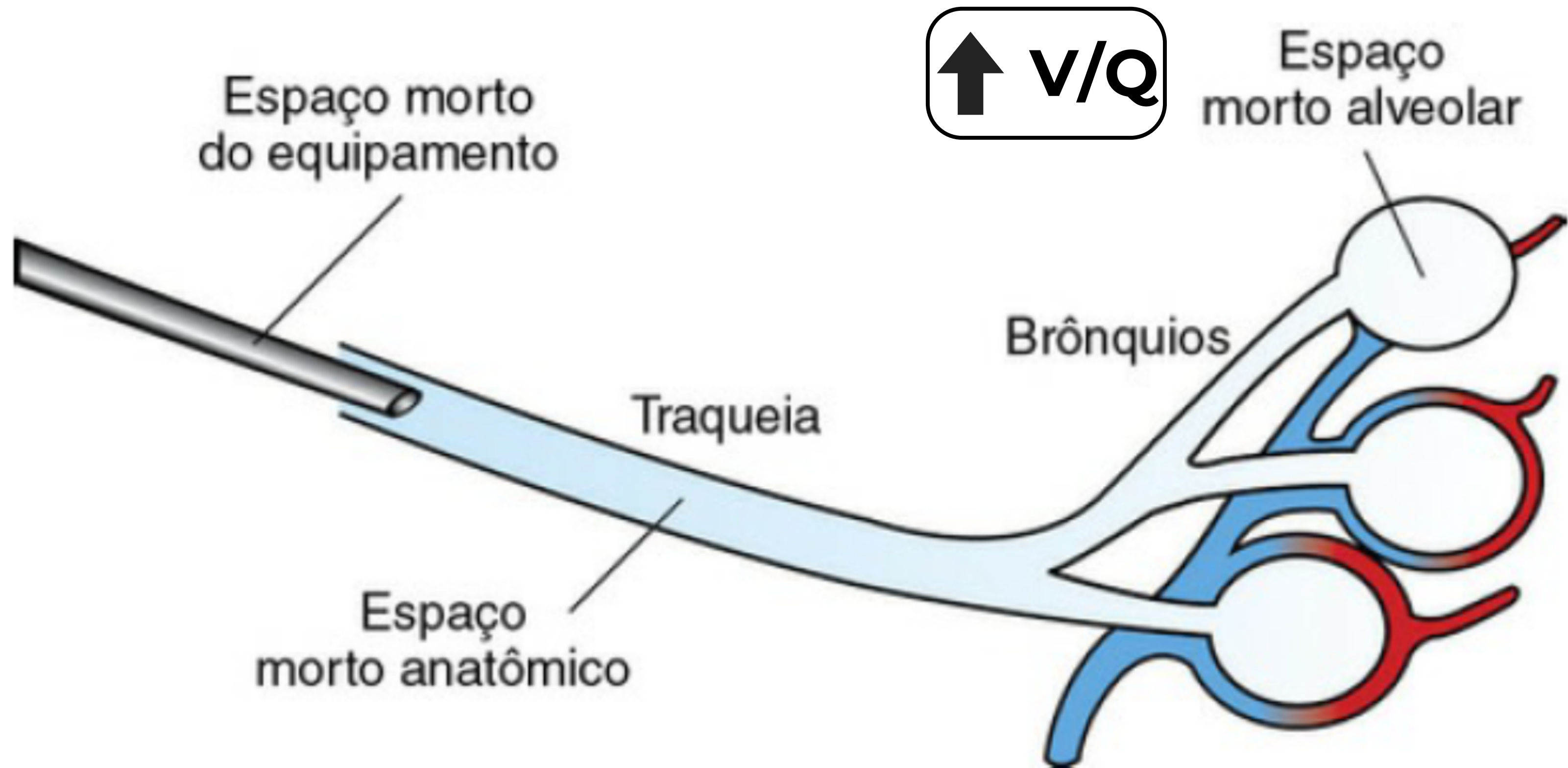
$$V/Q < 1$$

$$P_a > P_v > P_A$$

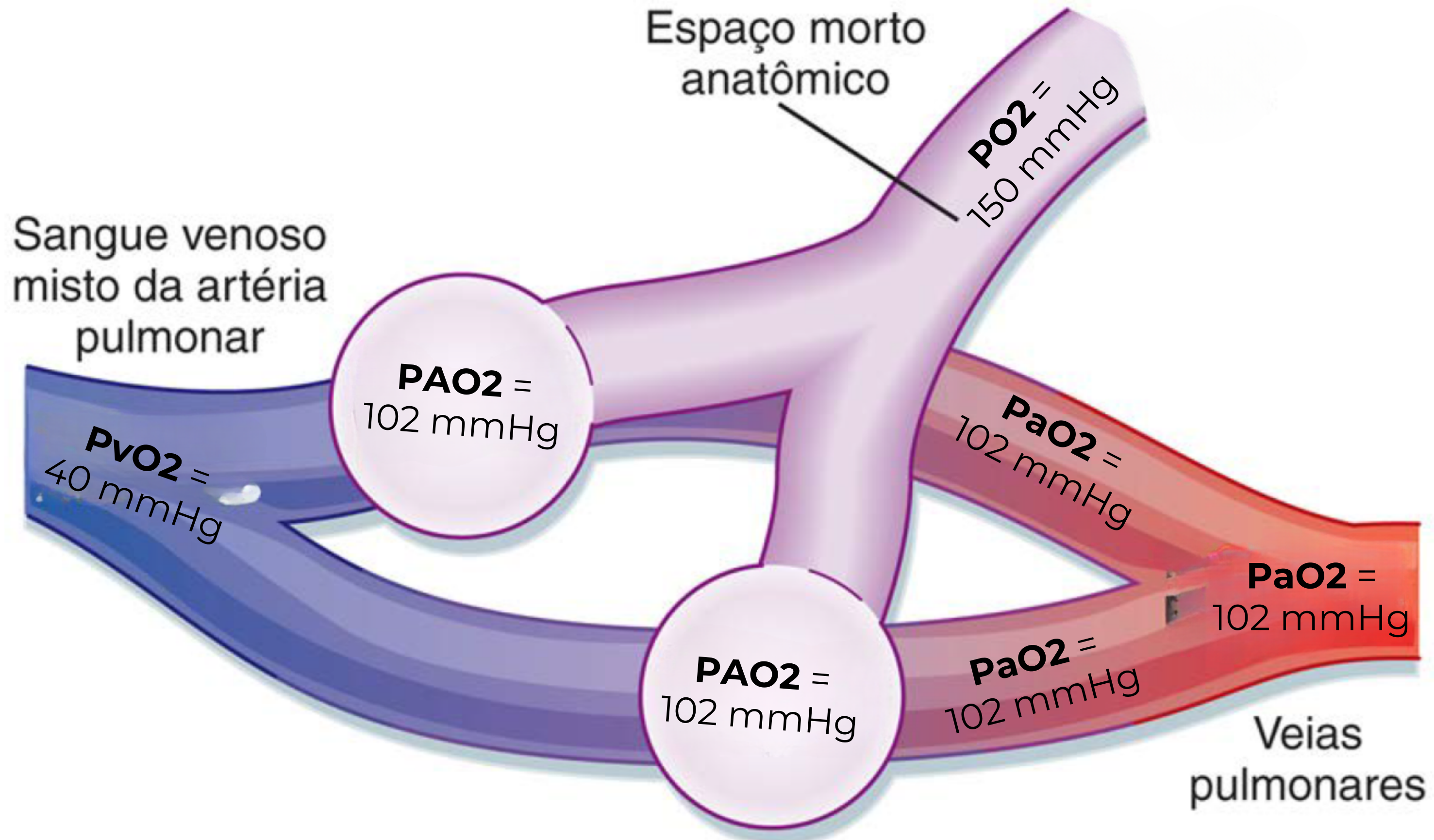
P_A = pressão alveolar
P_a = pressão arterial
P_v = pressão venosa



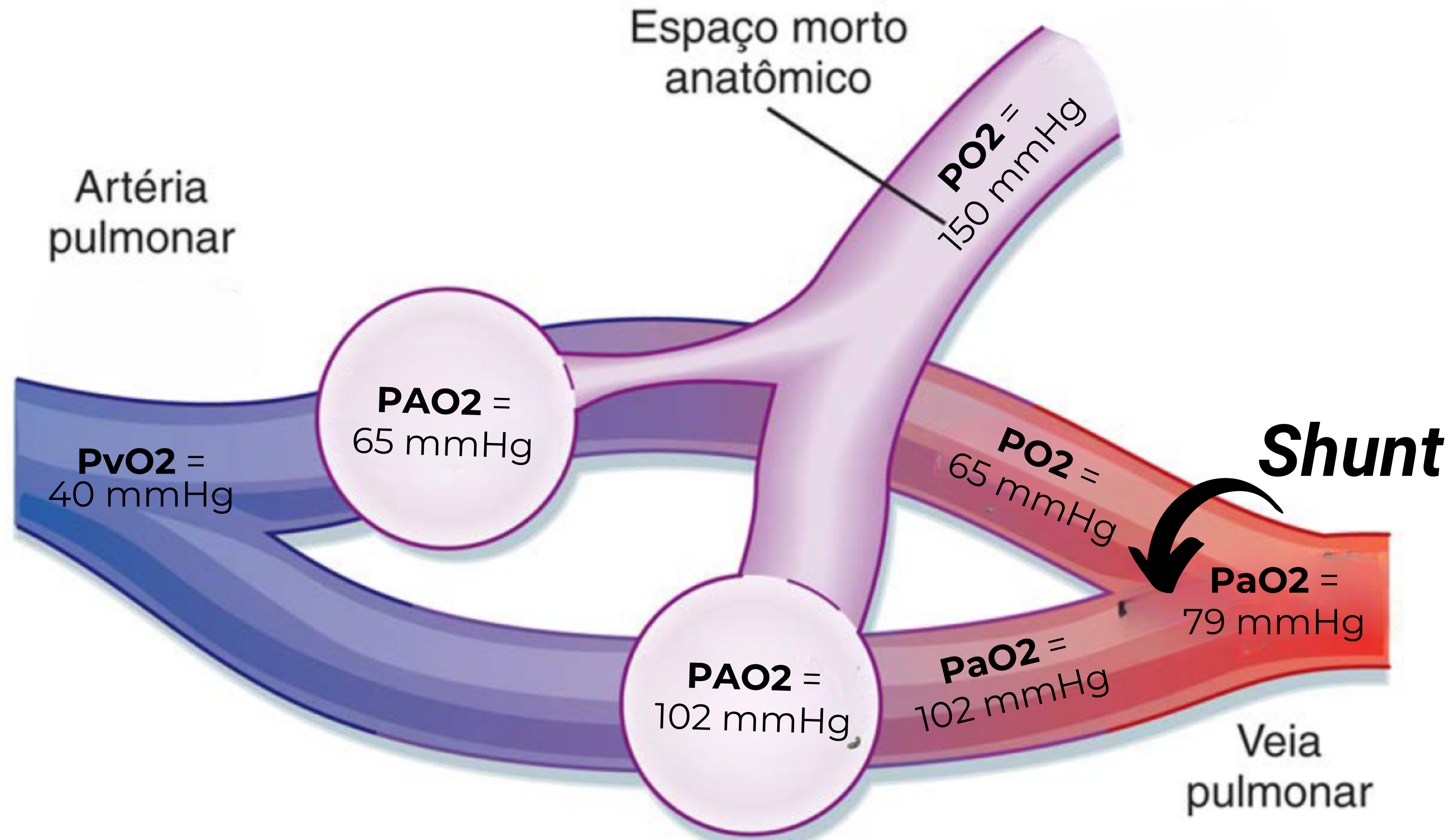
Espaço morto fisiológico (alveolar)



Shunt pulmonar



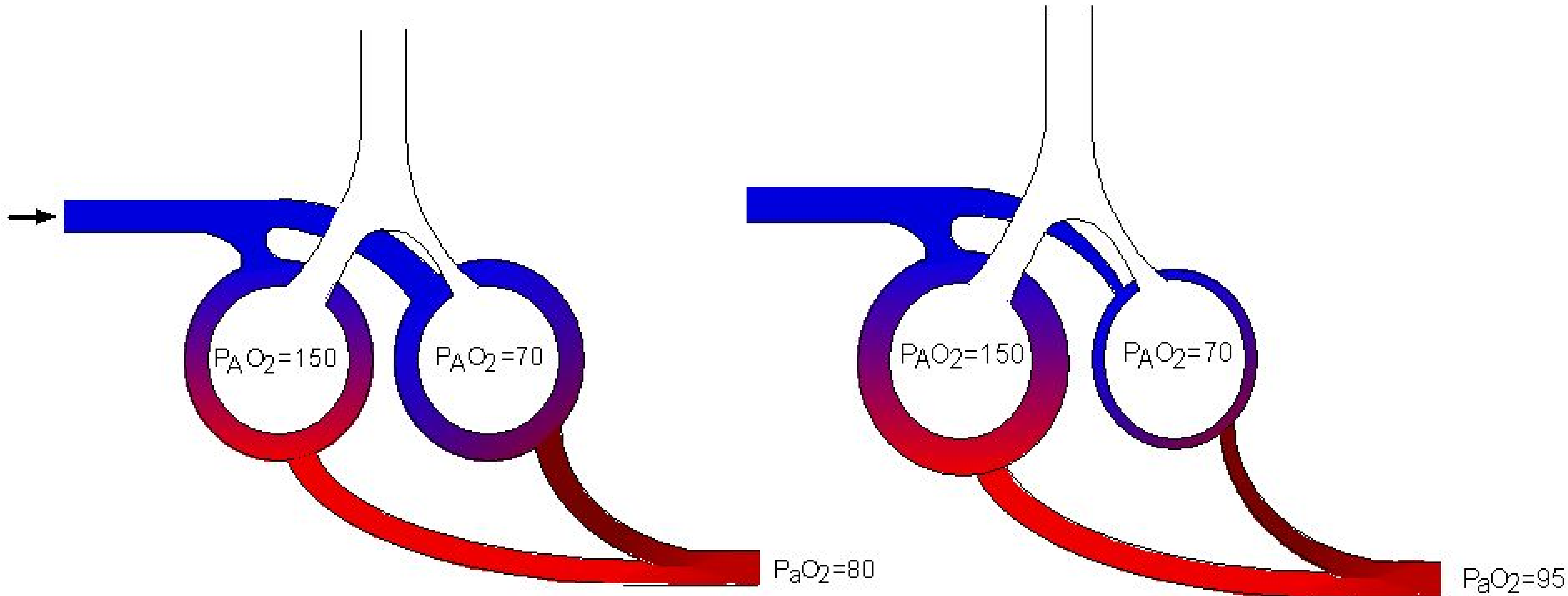
Shunt pulmonar



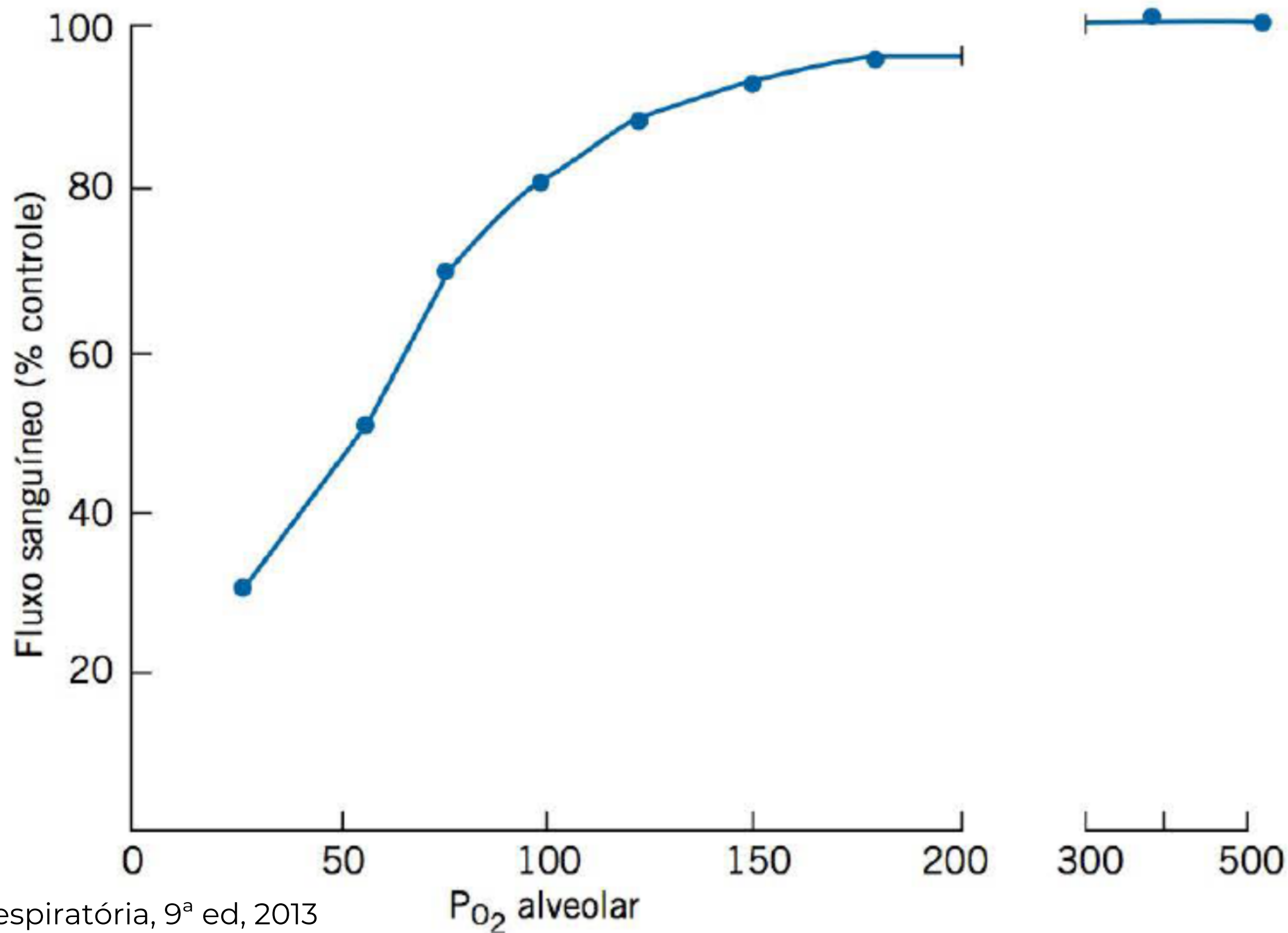


Vasoconstrição pulmonar hipóxica

Resposta fisiológica que desvia o fluxo sanguíneo para áreas com ventilação normal, a fim de manter a P_{aO_2} adequada.



Vasoconstrição pulmonar hipóxica



Laboratory Investigations | February 1996

Attenuated Hypoxic Pulmonary Vasoconstriction during Isoflurane Anesthesia Is Abolished by Cyclooxygenase Inhibition in Chronically Instrumented Dogs **FREE**

Paul F. Lennon, MD ; Paul A. Murray, PhD

+ Author and Article Information

Anesthesiology February 1996, Vol. 84, 404-414..

<https://doi.org/10.1097/00000542-199602000-00020>

Este é o primeiro estudo a demonstrar que a anestesia com isoflurano reduz a vasoconstrição pulmonar hipóxica em comparação com a resposta medida no mesmo animal no estado de consciência.

A vasoconstrição pulmonar hipóxica é preservada durante a anestesia com cetamina, e potencializada durante a anestesia com propofol.

Laboratory Investigations | September 1999

Ketamine Preserves and Propofol Potentiates Hypoxic Pulmonary Vasoconstriction Compared with the Conscious State in Chronically Instrumented Dogs **FREE**

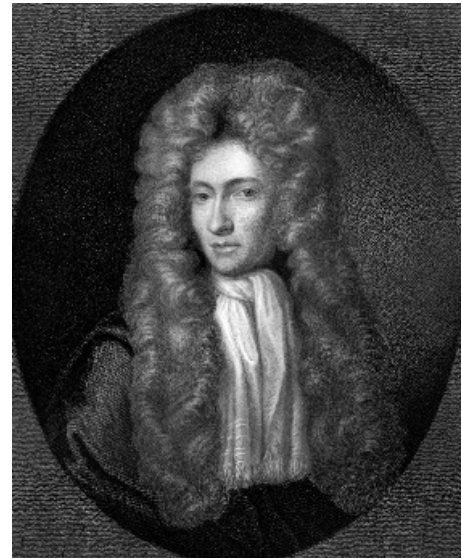
Masayasu Nakayama, M.D. ; Paul A. Murray, Ph.D.

Anesthesiology September 1999, Vol. 91, 760.

<https://doi.org/10.1097/00000542-199909000-00029>



Física dos Gases



Lei de Boyle

O volume de um gás \downarrow à medida que a pressão \uparrow (considerando a temperatura constante)



Lei de Charles

O volume do gás varia proporcionalmente à temperatura (considerando a pressão constante)



Lei de Henry

A quantidade de gás (P gás) dissolvido na água é diretamente proporcional à P gás à qual a água é exposta e seu coeficiente de solubilidade

Pressão parcial dos gases

Pressão do gás em uma mistura de gases

TERMINOLOGIA

P Pressão parcial → PO_2 ; PCO_2

a Arterial → PaO_2 ; $PaCO_2$

v Venosa → PvO_2 ; $PvCO_2$

A Alveolar → PAO_2 ; $PACO_2$

Unidade de medida
mmHg



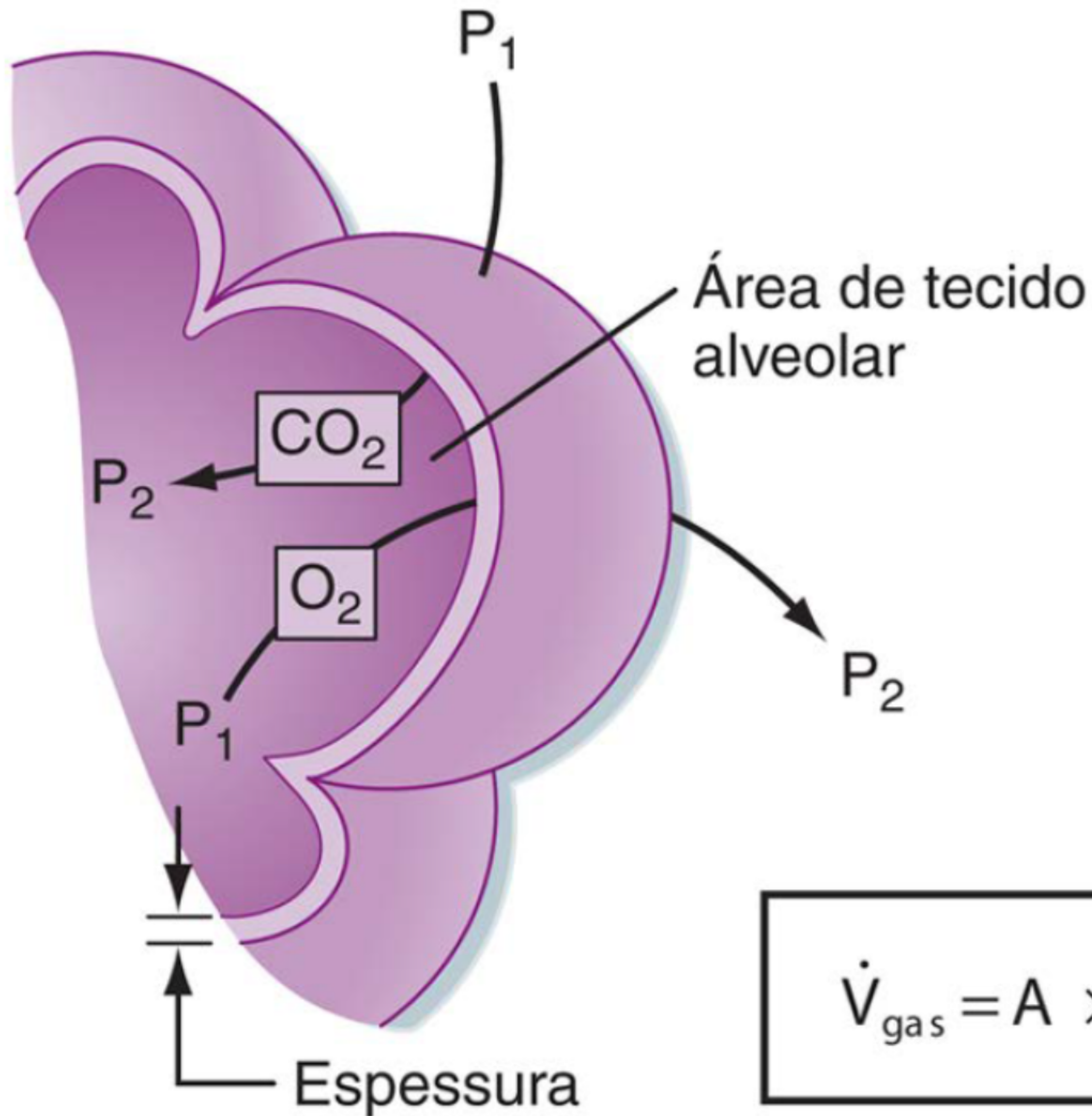
Pressão parcial dos gases

- Ar atmosférico ($F_{iO_2} = 21\%$, ou 0,21)
 - $O_2 \sim 20,9\%$
 - $CO_2 \sim 0,04\%$
 - $N_2 \sim 79,06\%$
 - $PO_2 \sim 159 \text{ mmHg}$
 - $PCO_2 \sim 3 \text{ mmHg}$
 - $PN_2 \sim 598 \text{ mmHg}$
- Mistura de gases com 50% de O_2 ($F_{iO_2} = 50\%$, ou 0,5)
 - $PO_2 = 380 \text{ mmHg}$
- Exposição à 100% de O_2 ($F_{iO_2} = 100\%$, ou 1,0)
 - $PO_2 = 760 \text{ mmHg}$

Pressão ATM =
760 mmHg
(ao nível do mar)



Difusão dos gases na membrana respiratória



V_{gas} = difusão

A = área da superfície

D = Coef. de difusão

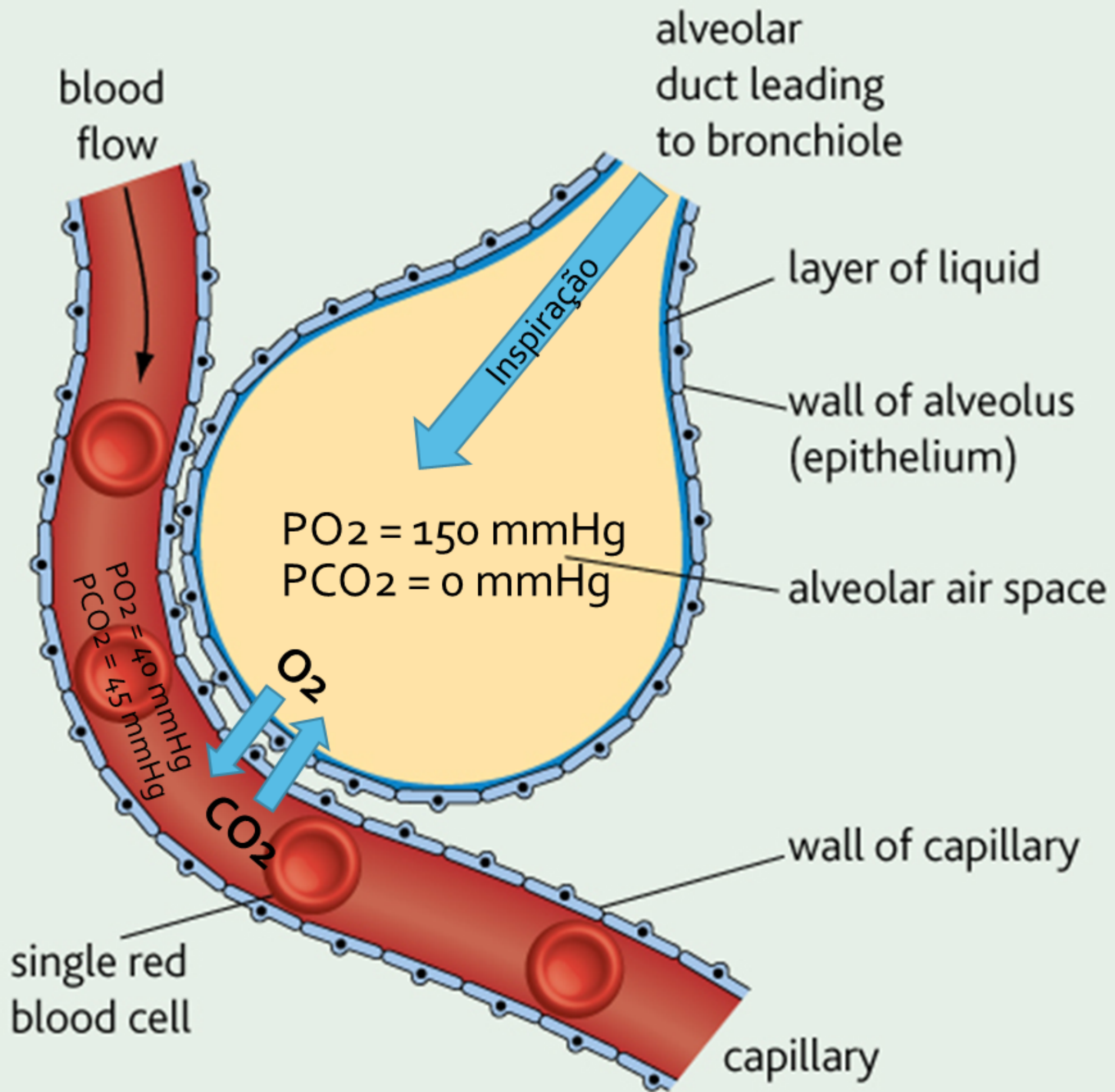
$(P_1 - P_2)$ = Diferença de P

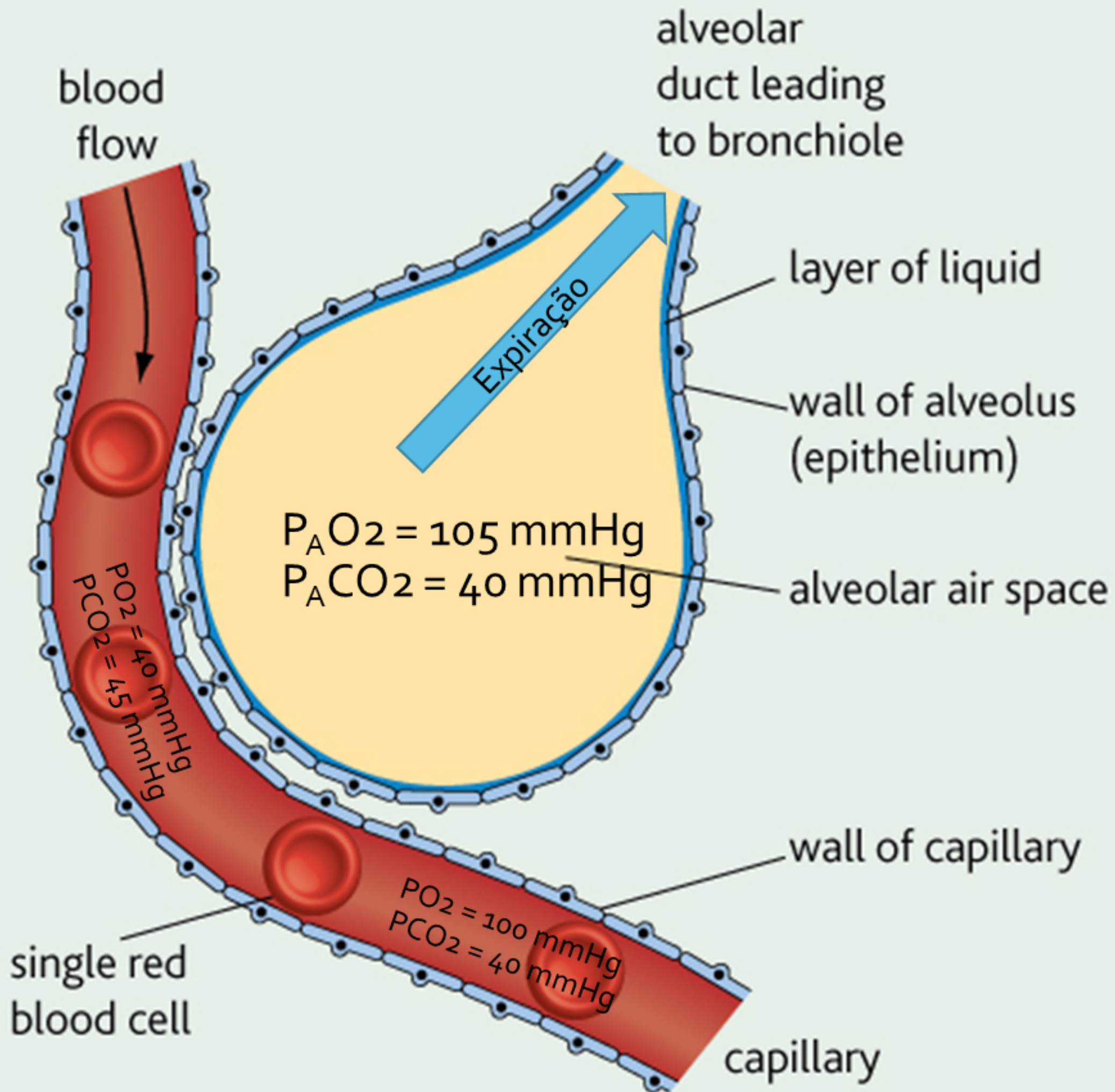
T = espessura da membrana

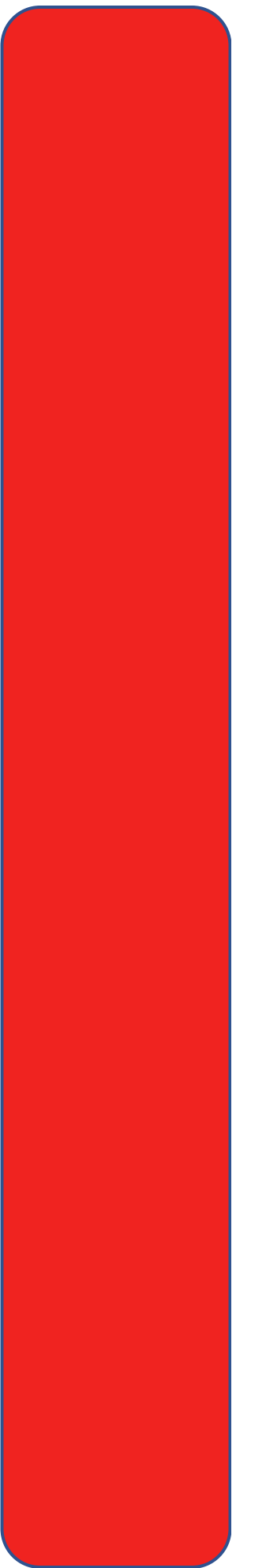
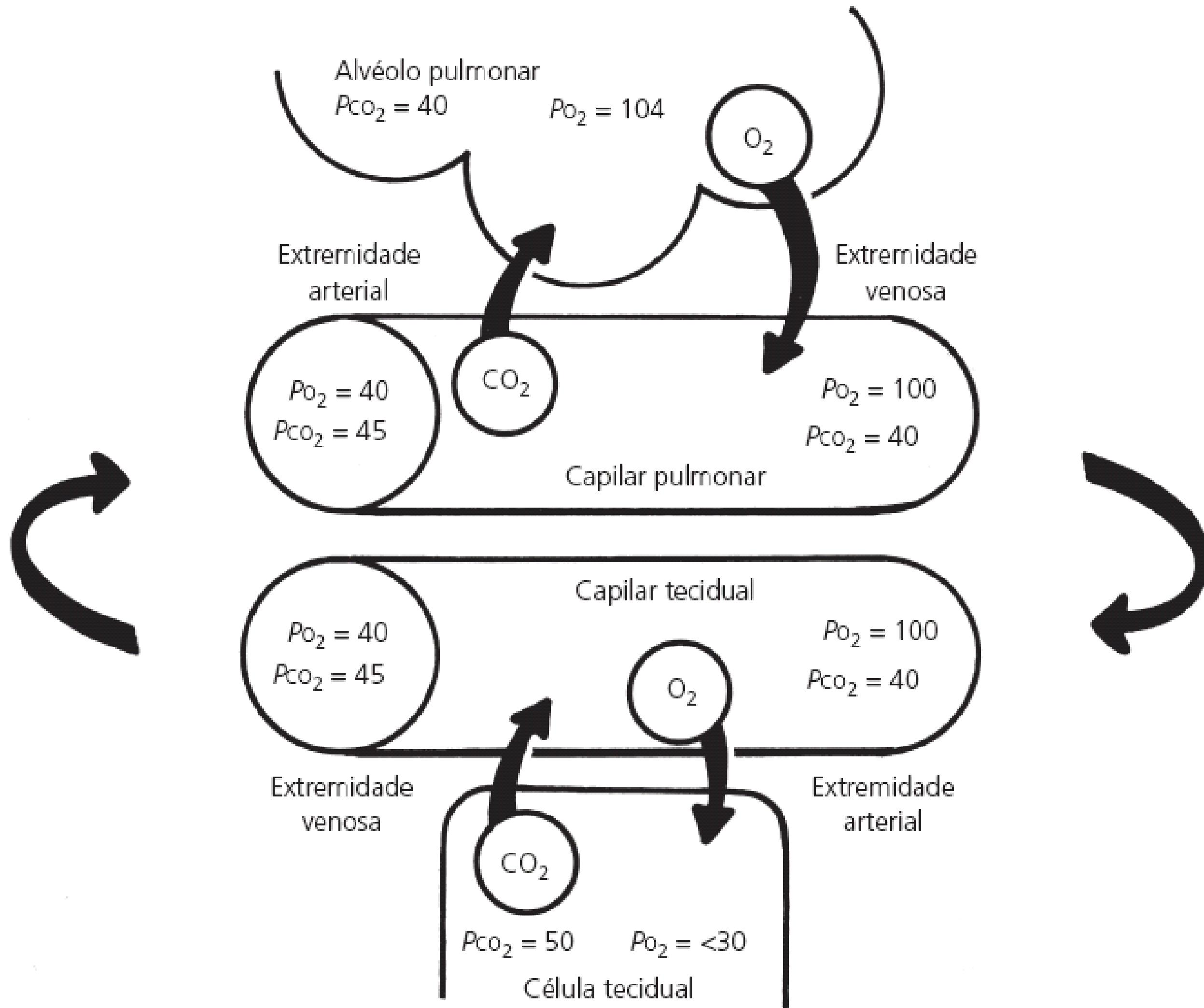
$$\dot{V}_{\text{gas}} = A \times D \times \frac{P_1 - P_2}{T}$$

Lei de Fick







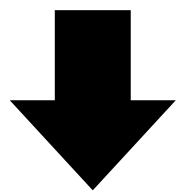


Ventilação pulmonar e pCO₂

VM ok

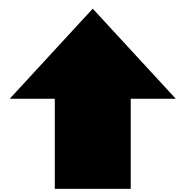
Normoventilação: PaCO₂ ~ 35 - 45 mmHg

VM



Hipoventilação: PaCO₂ > 45 mmHg

VM



Hiperventilação: PaCO₂ < 35 mmHg



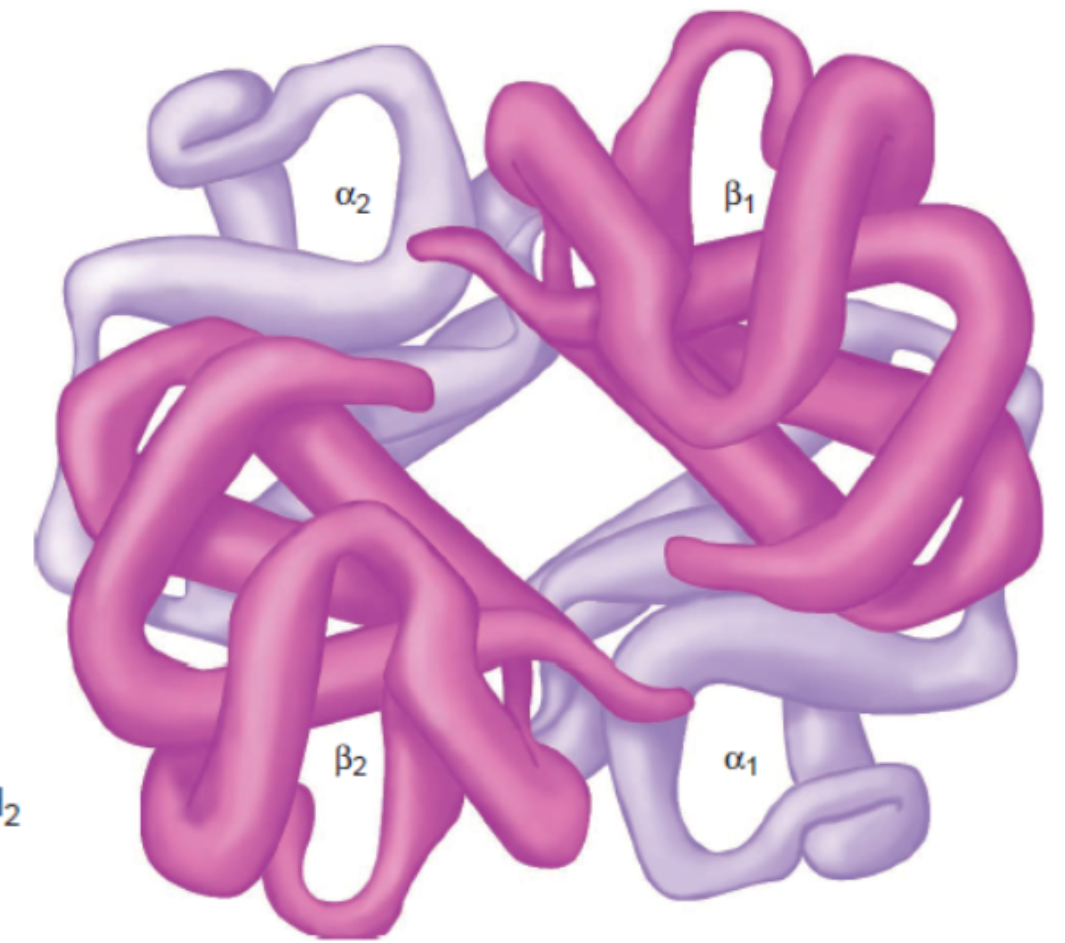
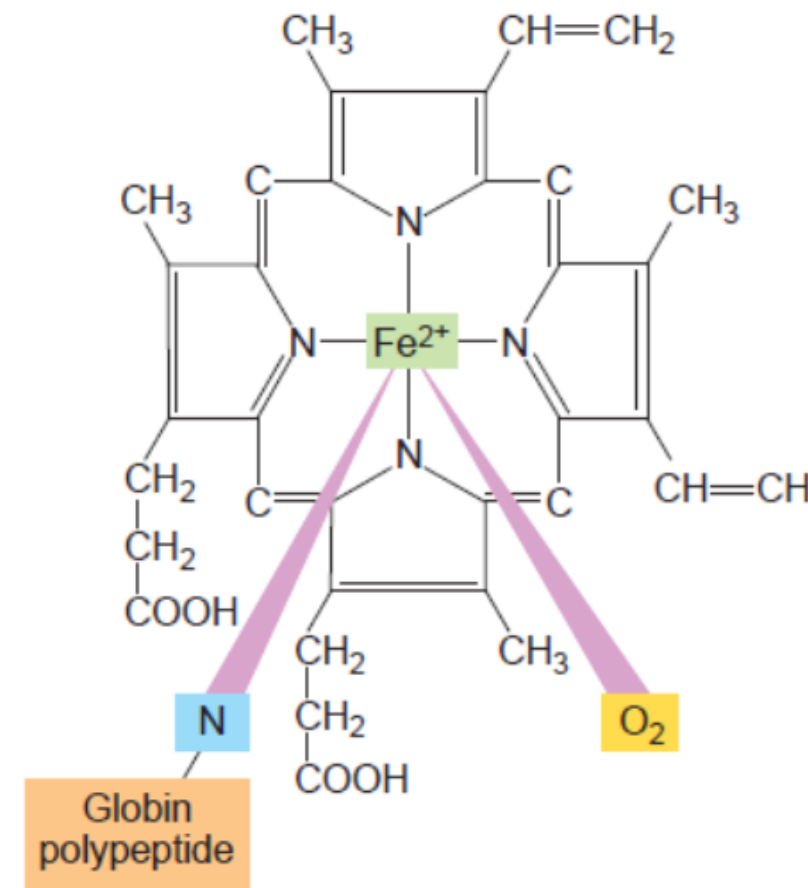
Transporte de oxigênio no sangue

Ligado à hemoglobina: **98,5%**

- 1,34 - 1,37 mL/g

Dissolvido no plasma: **1,5%**

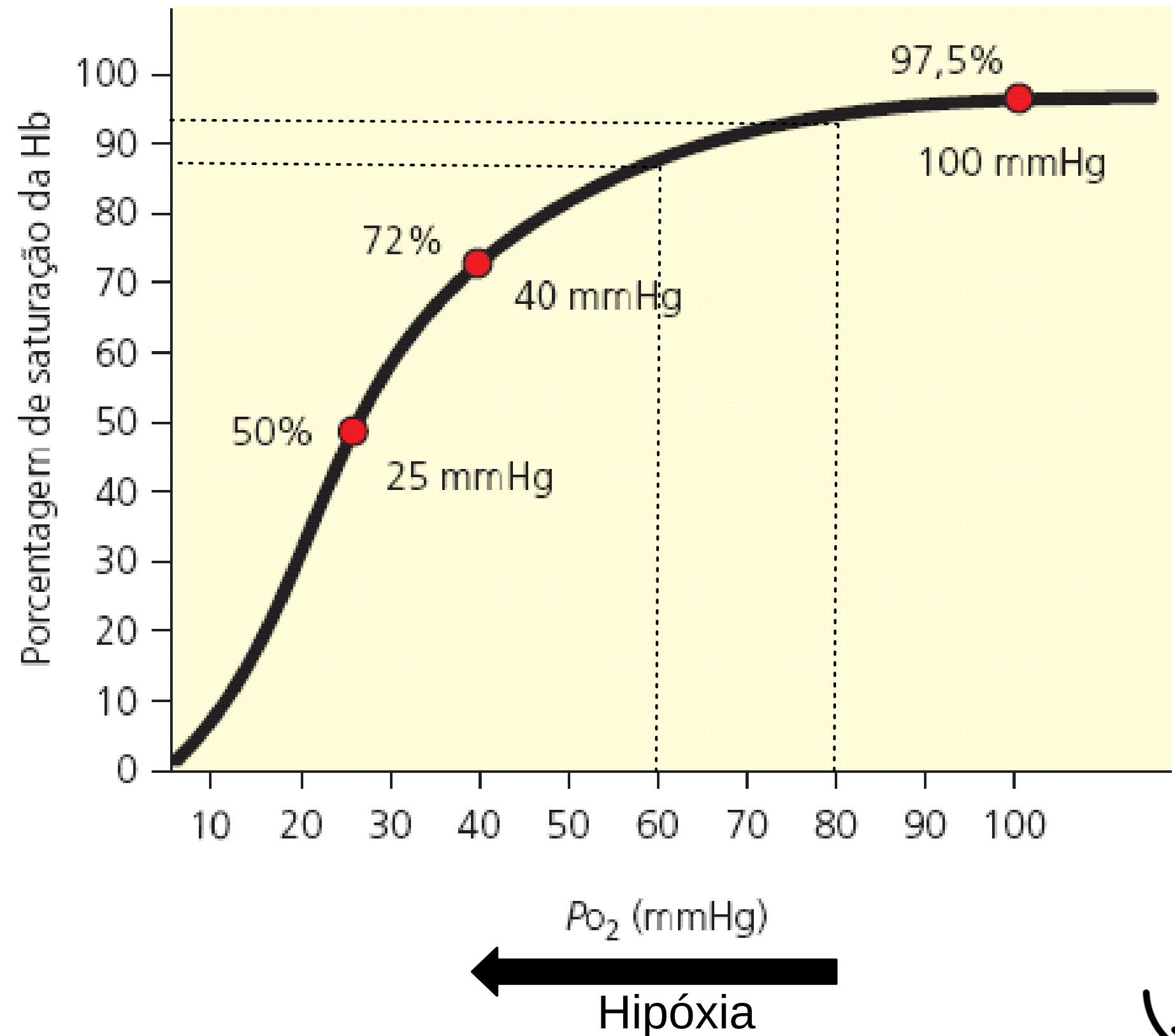
- 0,003 ml/mmHg/dL (0,3 ml/100ml quando $P_{aO_2} = 100$ mmHg)



Curva de dissociação oxigênio-hemoglobina

Percentual de saturação da hemoglobina em função da PO_2

P50 – PO_2 em que a hemoglobina está 50% saturada com O_2



Fatores que afetam a afinidade da Hb pelo O₂

Efeito Bohr

pH (estado ácido-base)

↑ pH = ↑ afinidade

↓ pH = ↓ afinidade

[CO₂]

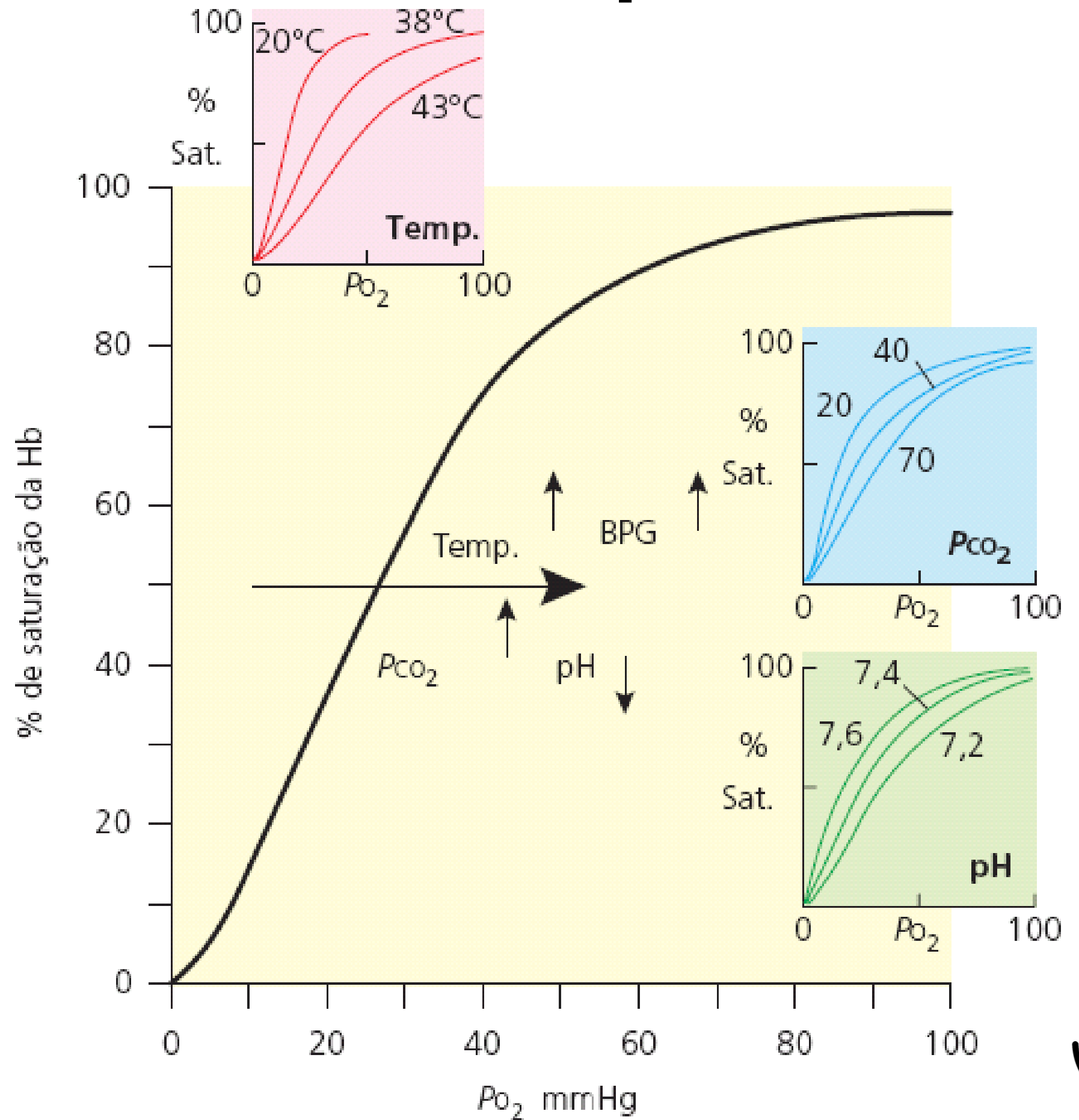
↓ [CO₂] = ↑ afinidade

↑ [CO₂] = ↓ afinidade

Temperatura

↓ Temp. = ↑ afinidade

↑ Temp. = ↓ afinidade



Conteúdo arterial de oxigênio (CaO₂)

CaO₂ → quantidade de O₂ (mL) transportado no sangue

$$\text{CaO}_2 \text{ (ml/dL)} = [(1,37 \times \text{Hb} \times \text{SaO}_2) + (\text{PaO}_2 \times 0,003)]$$

* 1 g de Hg pode carrear 1,37 mL de O₂ se estiver 100% saturada

** Hb expressa em g/dL

** SaO₂ (ou SpO₂) expressa como fração (0 – 1) e não como percentual (0 – 100%)

[Hemoglobina no sangue] ~ 12,0 - 18,0 g/dL

Saturação de O₂ no sangue arterial ≥ 98% (0,98)

PaO₂ normal ~ 100 mmHg (para uma FiO₂ de 21%)



Conteúdo arterial de oxigênio (CaO₂)

$$\text{CaO}_2 \text{ (ml/dL)} = [(1,37 \times \text{Hb} \times \text{SaO}_2) + (\text{PaO}_2 \times 0,003)]$$

Situação A

Hb = 15 g/dL

SaO₂ = 99% (0,99)

PaO₂ = 100 mmHg

Situação B

Hb = 15 g/dL

SaO₂ = 85% (0,85)

PaO₂ = 60 mmHg

Situação C

Hb = 8 g/dL

SaO₂ = 99% (0,99)

PaO₂ = 100 mmHg



Conteúdo arterial de oxigênio (CaO₂)

$$\text{CaO}_2 \text{ (ml/dL)} = [(1,37 \times \text{Hb} \times \text{SaO}_2) + (\text{PaO}_2 \times 0,003)]$$

Situação A

Hb = 15 g/dL

SaO₂ = 99% (0,99)

PaO₂ = 100 mmHg

CaO₂ = 20,2 mL/dL

Situação B

Hb = 15 g/dL

SaO₂ = 85% (0,85)

PaO₂ = 60 mmHg

CaO₂ = 17,3 mL/dL

Situação C

Hb = 8 g/dL

SaO₂ = 99% (0,99)

PaO₂ = 100 mmHg

CaO₂ = 11,0 mL/dL



Conteúdo arterial de oxigênio (CaO₂)

$$\text{CaO}_2 \text{ (ml/dL)} = [(1,37 \times \text{Hb} \times \text{SaO}_2) + (\text{PaO}_2 \times 0,003)]$$

Situação C

Hb = 8 g/dL

SaO₂ = 99% (0,99)

PaO₂ = 100 mmHg

CaO₂ = 11,0 mL/dL

Situação Csup

FiO₂ 100%

Hb = 8 g/dL

SaO₂ = 99% (0,99)

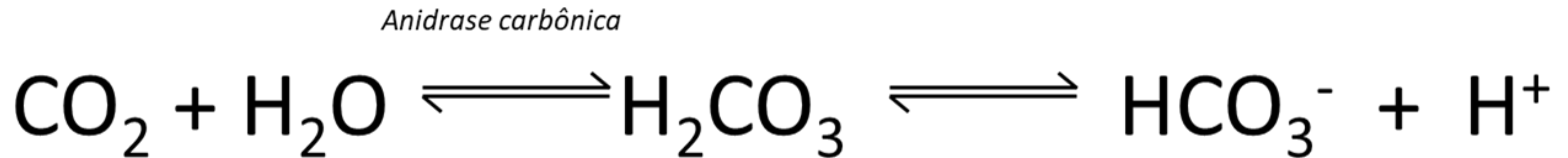
PaO₂ = 400 mmHg

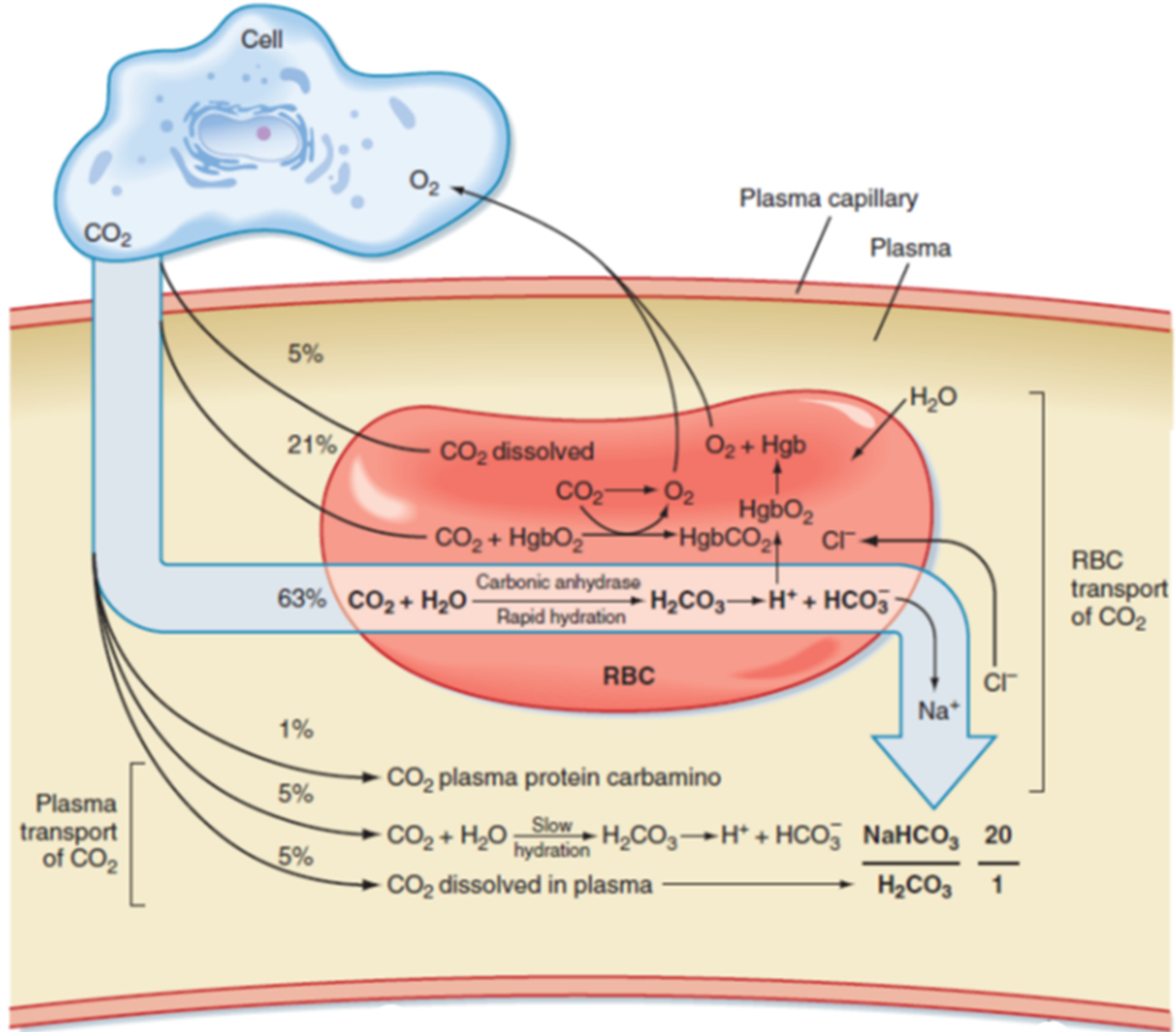
CaO₂ = 12,1 mL/dL



Transporte de CO₂ no sangue

- Sob a forma HCO₃⁻: ~ 68%
- Dissolvido (Plasma e LIC das hemácias): ~10%
- Ligado à proteínas (complexo-carbamino-proteína): ~22%





Controle e regulação da respiração

A respiração é um processo involuntário

Podemos voluntariamente modificar a respiração

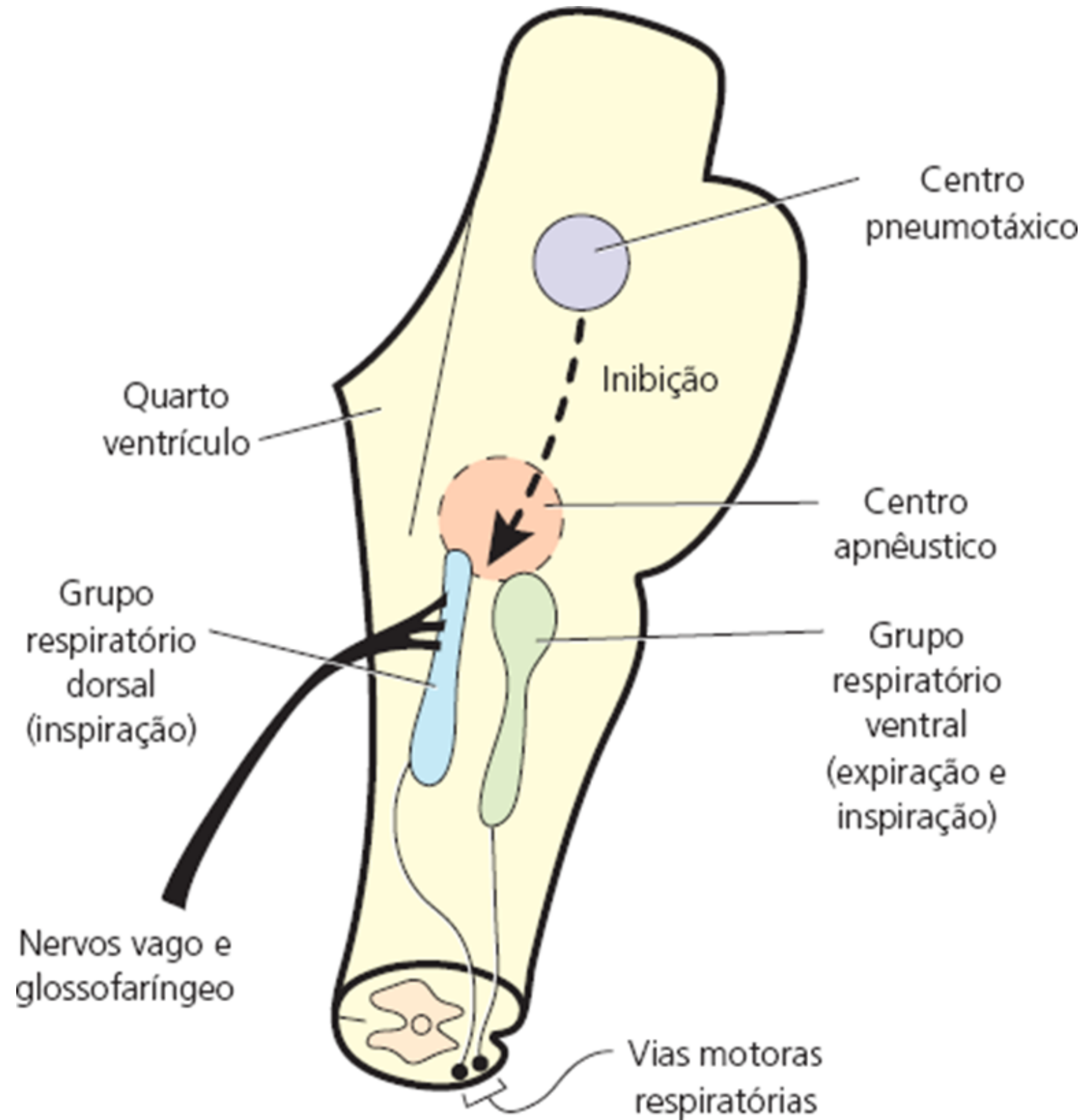
Objetivos da regulação: manter PaO_2 e $PaCO_2$ adequadas

Estruturas que participam desta regulação:

- Centro respiratório do tronco encefálico (ponte e bulbo)
- Quimiorreceptores centrais
- Quimiorreceptores periféricos
- Mecanorreceptores pulmonares



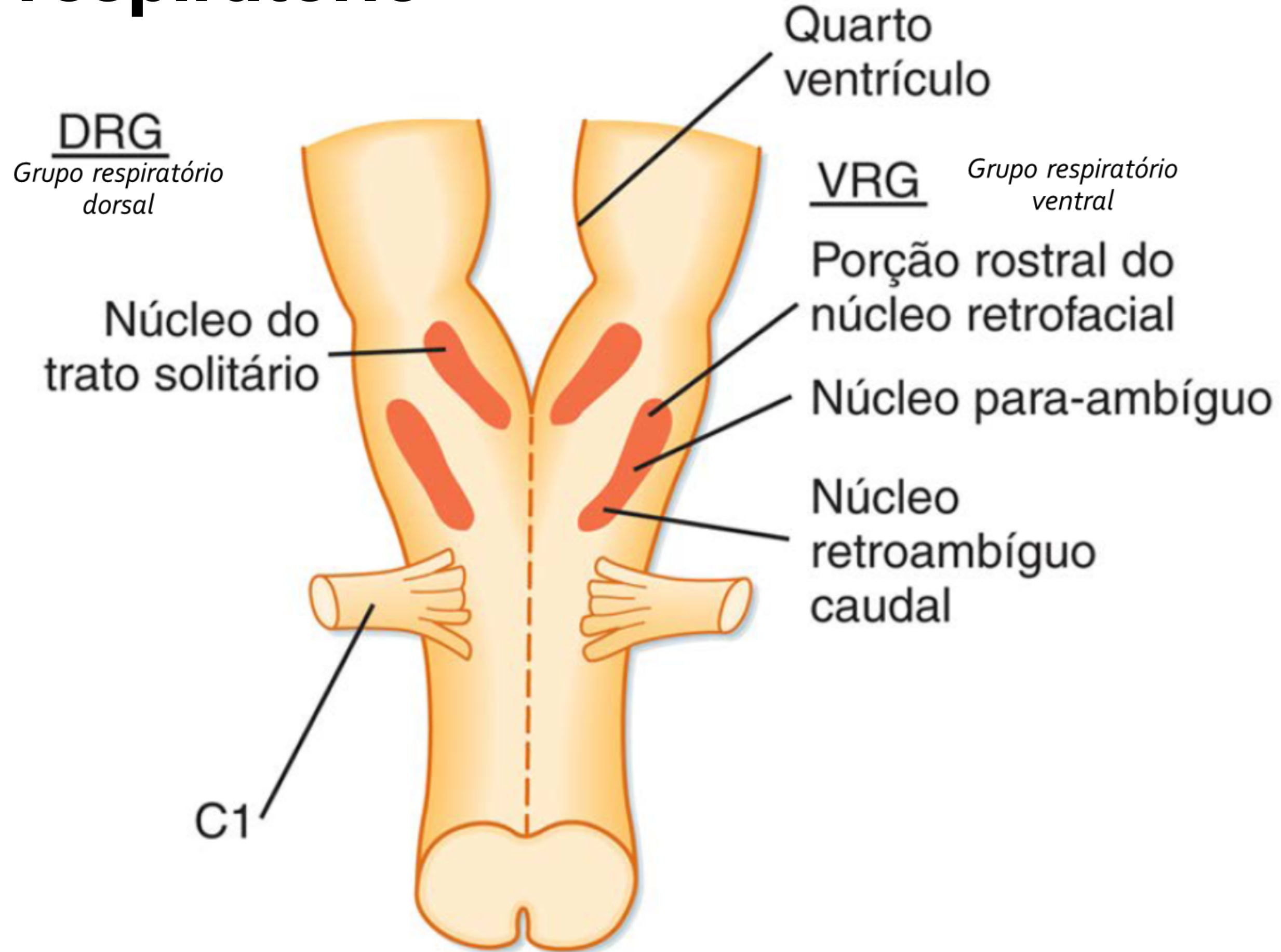
Centro respiratório



Centro respiratório



Centro respiratório



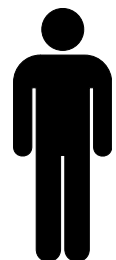
Grupos respiratórios

Dorsal (GRD, DRG)

- É a principal área inspiratória
- Determina o ritmo básico da respiração
- Contração do diafragma (n. frênico) e intercostais externos (n. intercostais)

Ventral (DRV, VRG)

- Neurônios inspiratórios e expiratórios
- Inativa durante uma respiração normal e calma
- Ativo durante a respiração forçada
- Contração dos nervos intercostais internos e abdominais



A inspiração normal dura cerca de 2 seg., enquanto a expiração dura cerca de 3 seg. Logo, uma respiração dura 5 seg., o que se traduz numa frequência respiratória basal de 12 resp/min.



Centro pneumotáxico e apnêustico

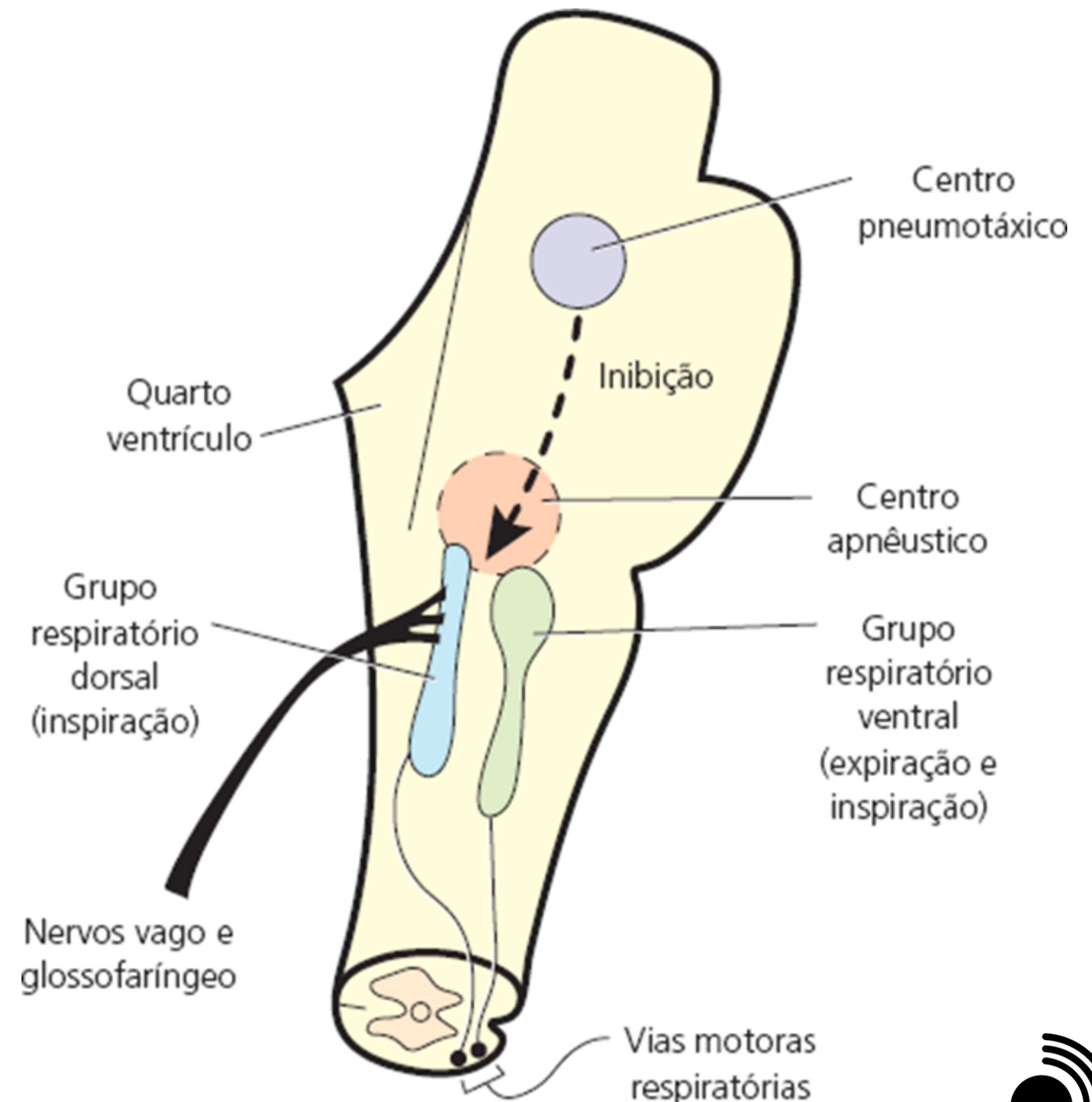
Centro pneumotáxico

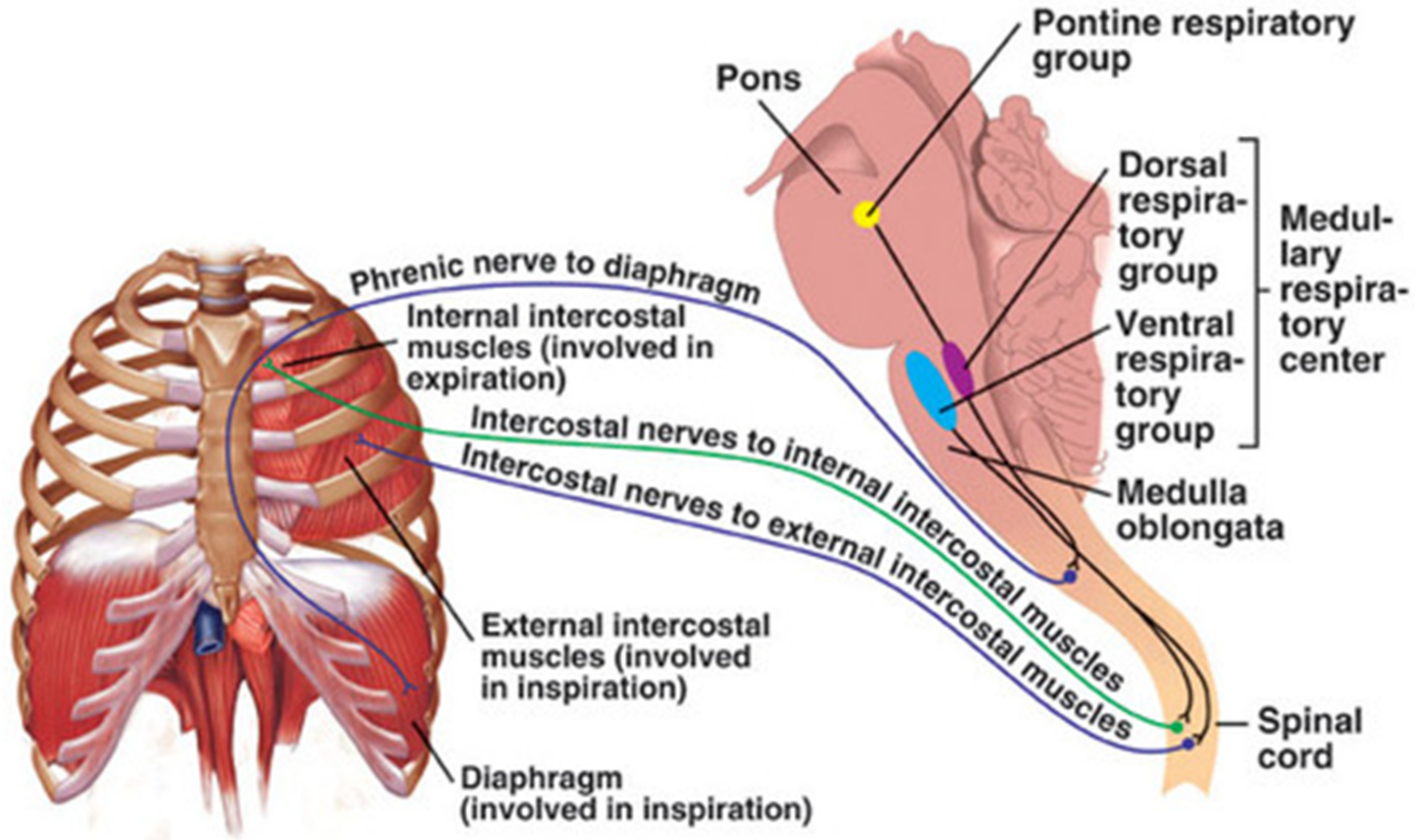
- Inibe a área inspiratória
- Limita a inspiração
- Quando ativo, a respiração fica mais rápida

Centro apnêustico

- Estimula a área inspiratória
- Inspiração prolongada
- Ajustes pontuais no VM
- $\downarrow f$

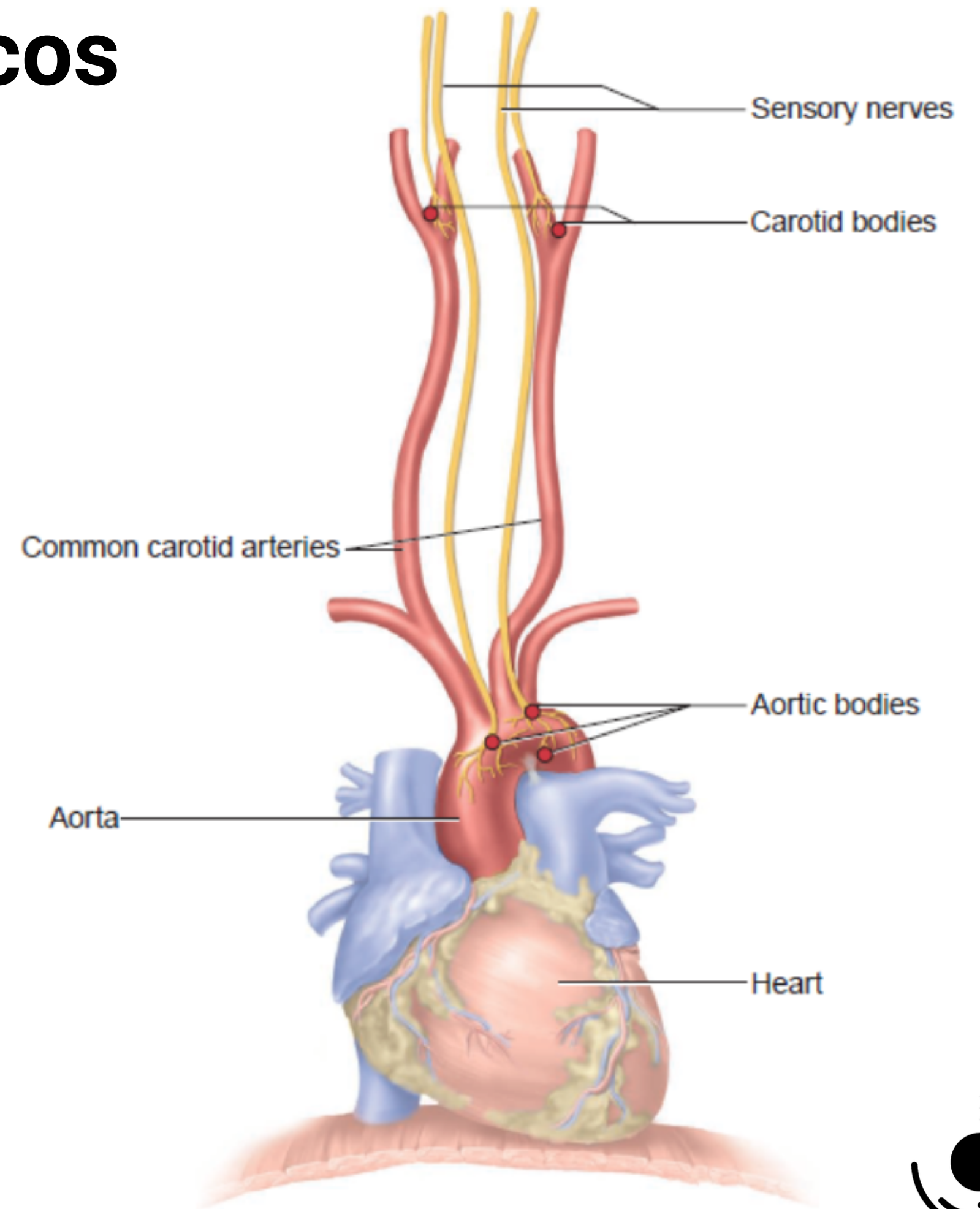
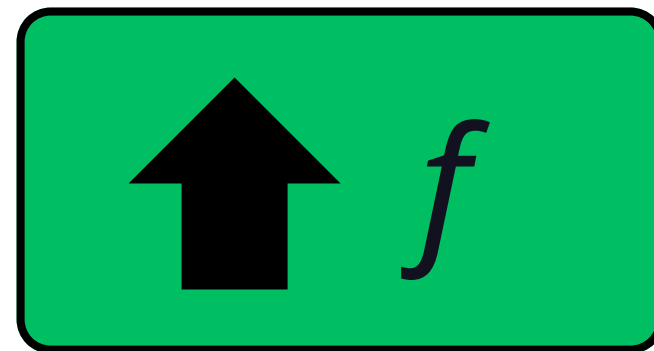
* Ainda se conhece pouco sobre sua função





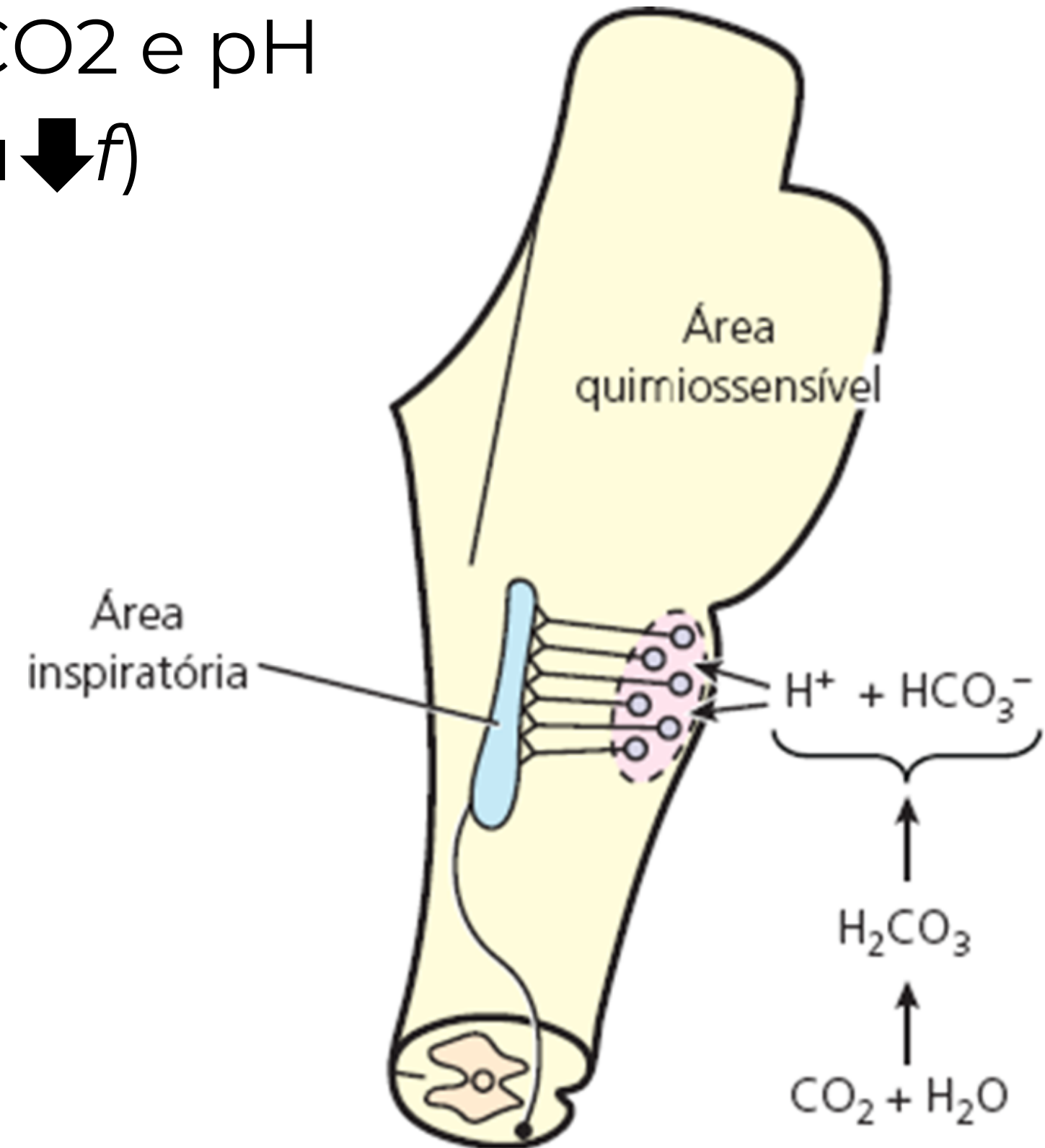
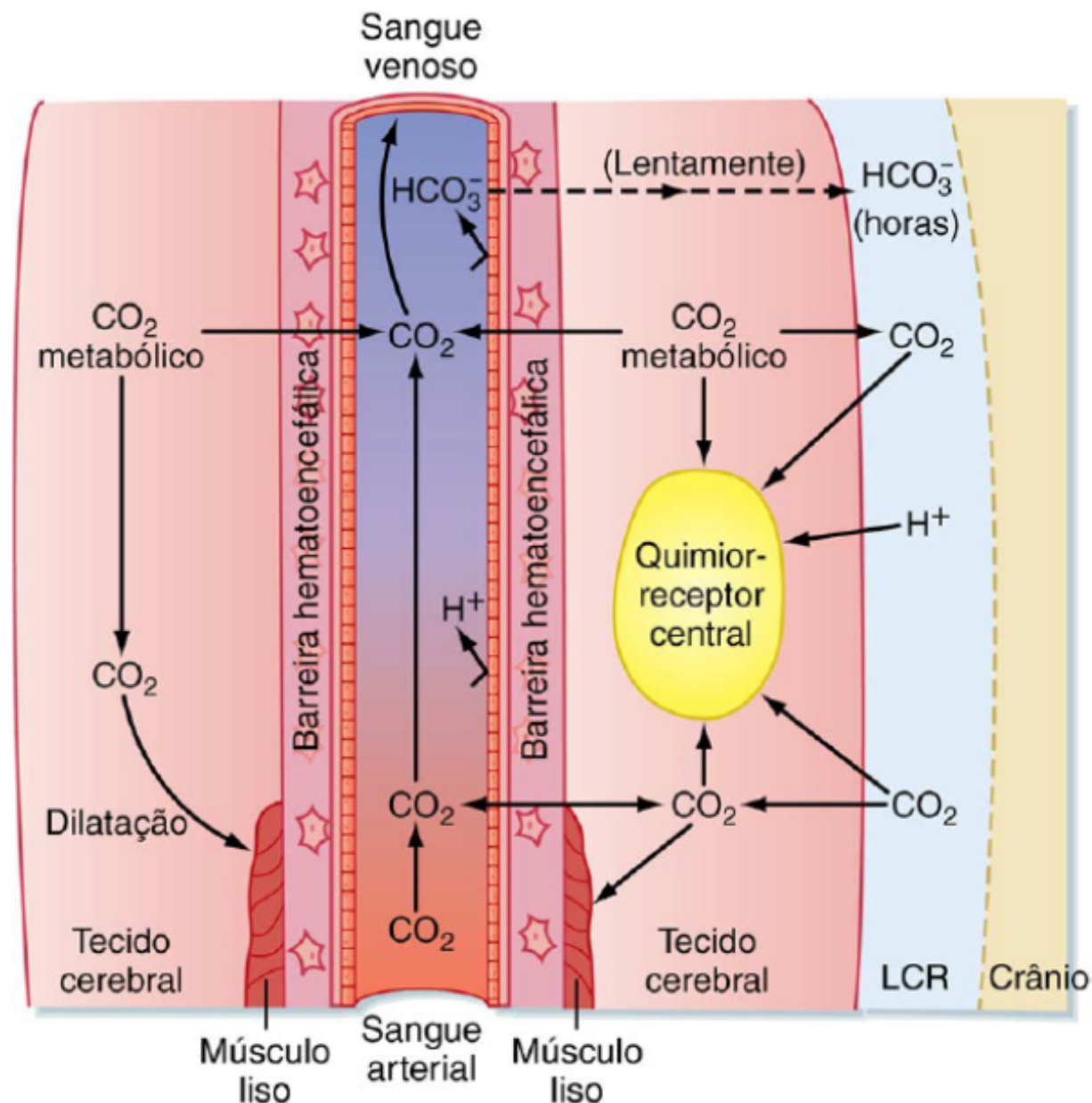
Quimiorreceptores periféricos

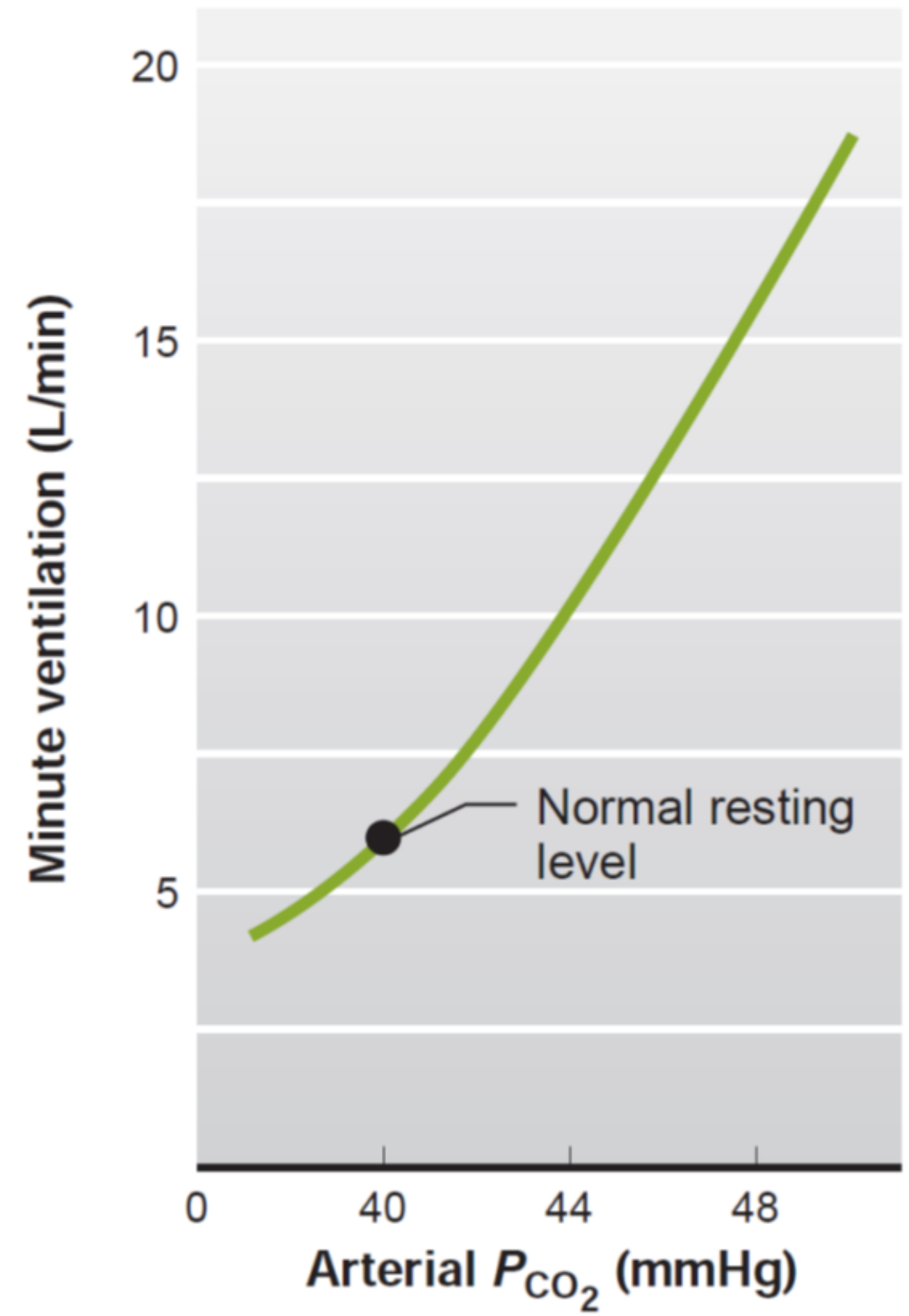
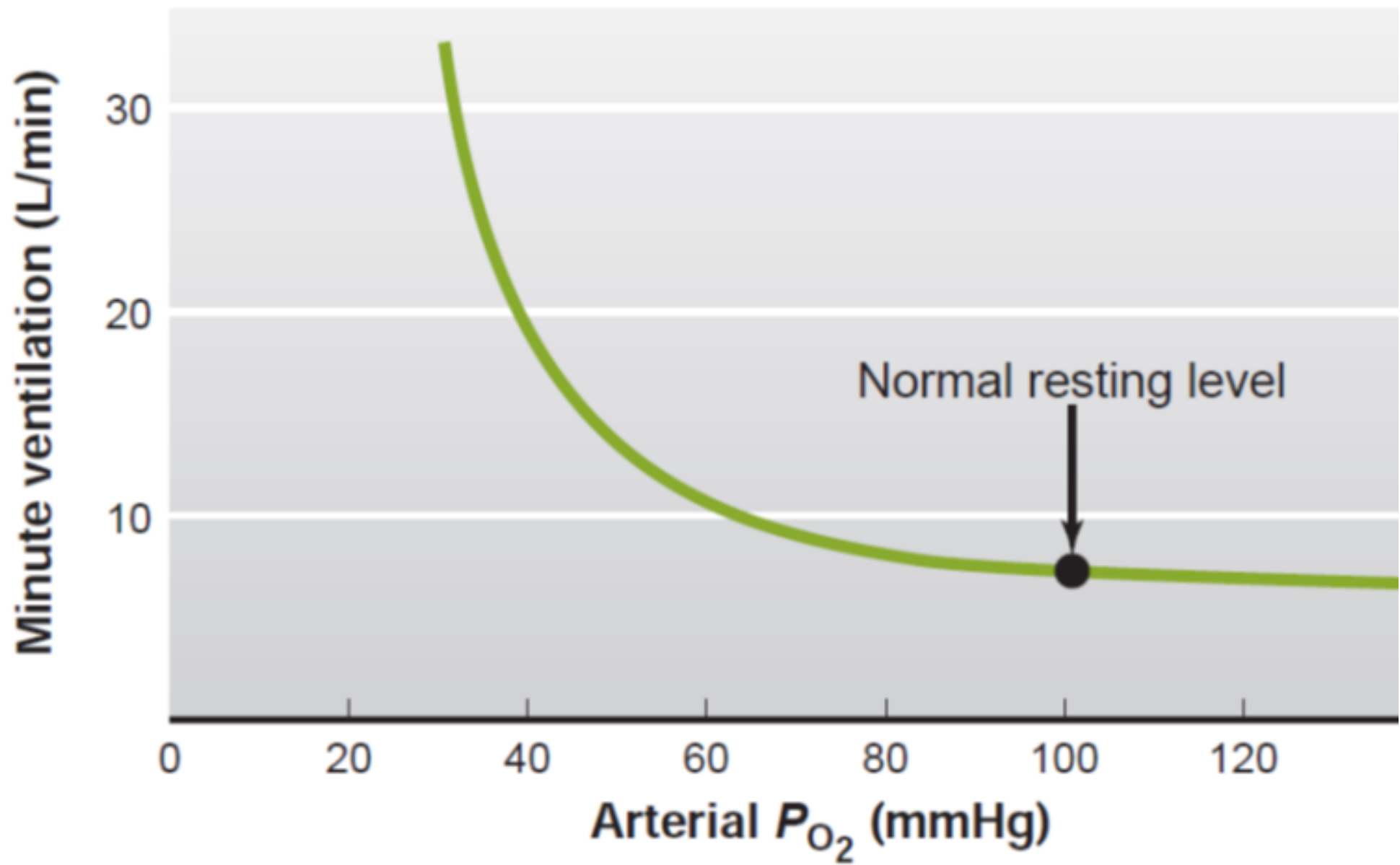
- Arco aórtico e seio carotídeo
- Estimulados pela \downarrow da PaO_2
(e também \uparrow da PaCO_2 e $[\text{H}^+]$)
- Aferências: nn. Vago (X) e glossofaríngeo (IX)
(em direção ao centro integrador)
- Resposta à hipoxemia:

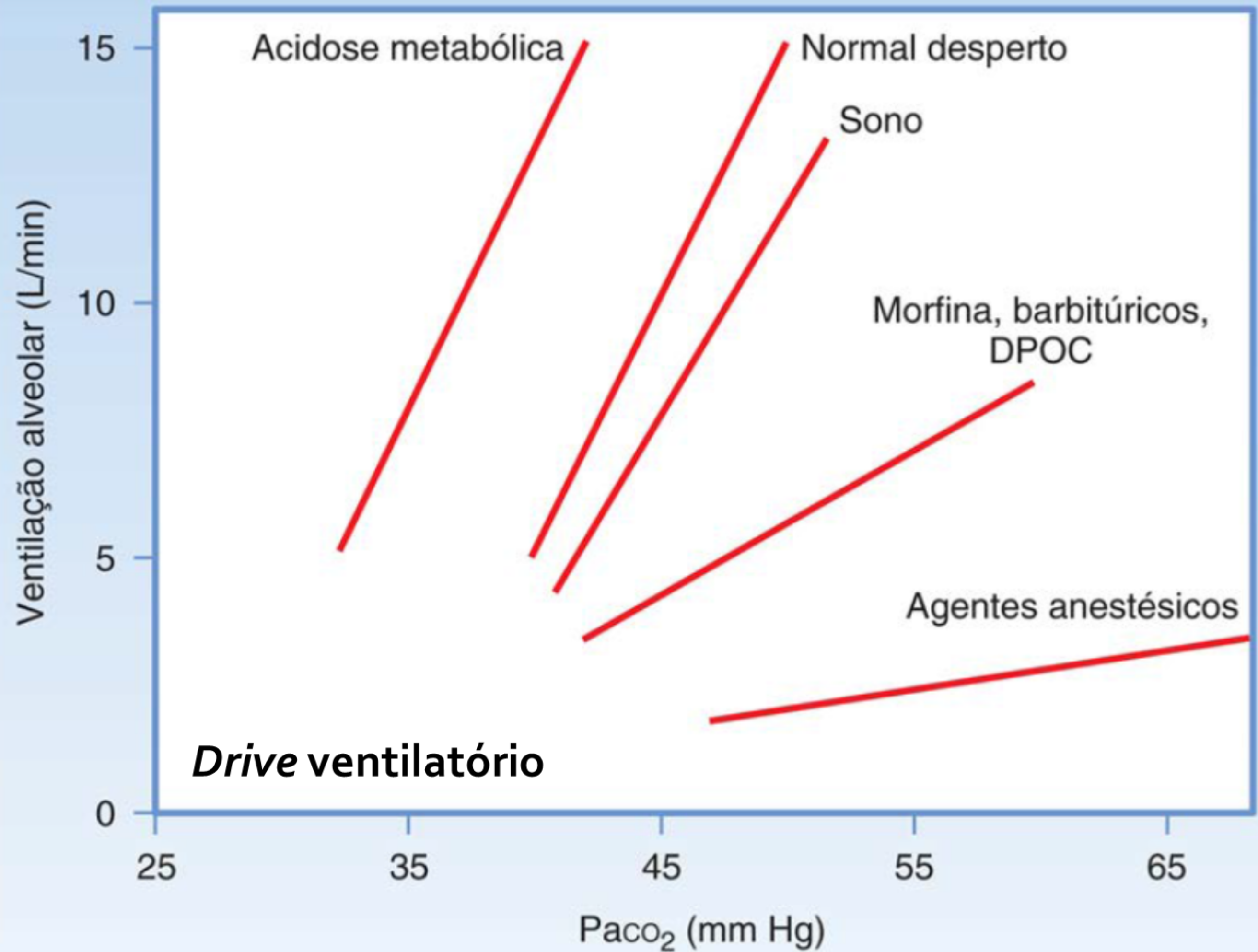


Quimiorreceptores centrais

- Detectam alterações na PaCO_2 e pH
- Modulam a ventilação (\uparrow ou $\downarrow f$)







OBRIGADO

