

Curso de Fisiologia: Medicina do Mergulho

Giovana Germano Tose

R4 - pneumologia e alergia pediátrica no HIJPII



Mergulho

APNEIA: mergulho livre, ar retido nos pulmões.

SNORKELING: permanece à superfície usando apenas um par de barbatanas, uma máscara e um tubo de respiração.

MERGULHO AUTÔNOMO: com auxílio de aparelhos de respiração subaquática independente da superfície.



Mergulho

Principais impactos fisiológicos

Pressão ambiente elevada
Efeitos reduzidos da gravidade
Respiração alterada
Hipotermia
Deterioração sensorial

Intensidade do impacto

Profundidade alcançada
Duração do mergulho
Modo de mergulho

- Apneia
- Dispositivo respiração subaquática

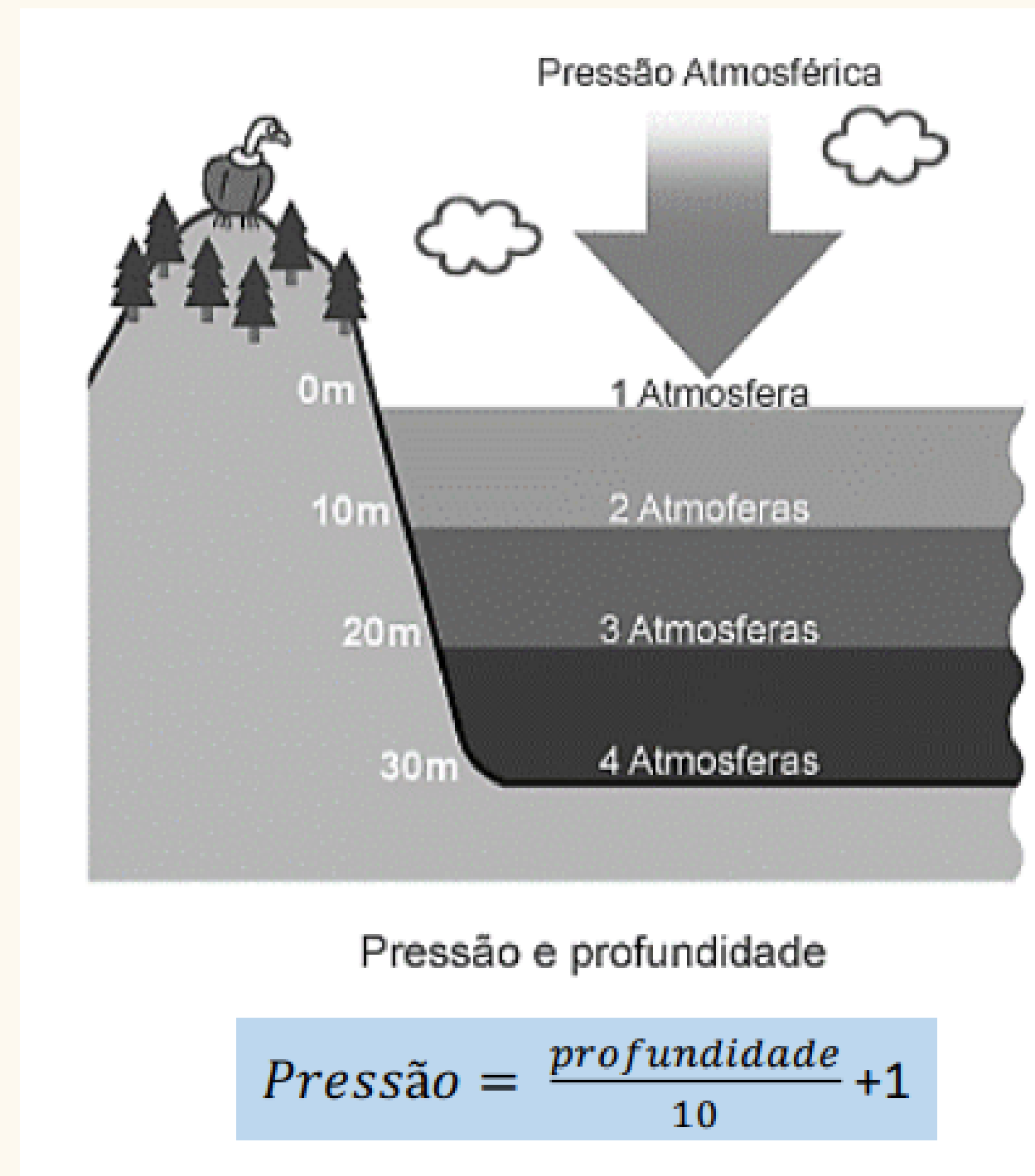
Princípios físicos

● Pressão

Pressão em uma coluna de líquido:

- Altura da coluna
- Densidade do líquido
- Aceleração da gravidade

10m de água do mar = 1 atm
10,36m de água doce = 1 atm



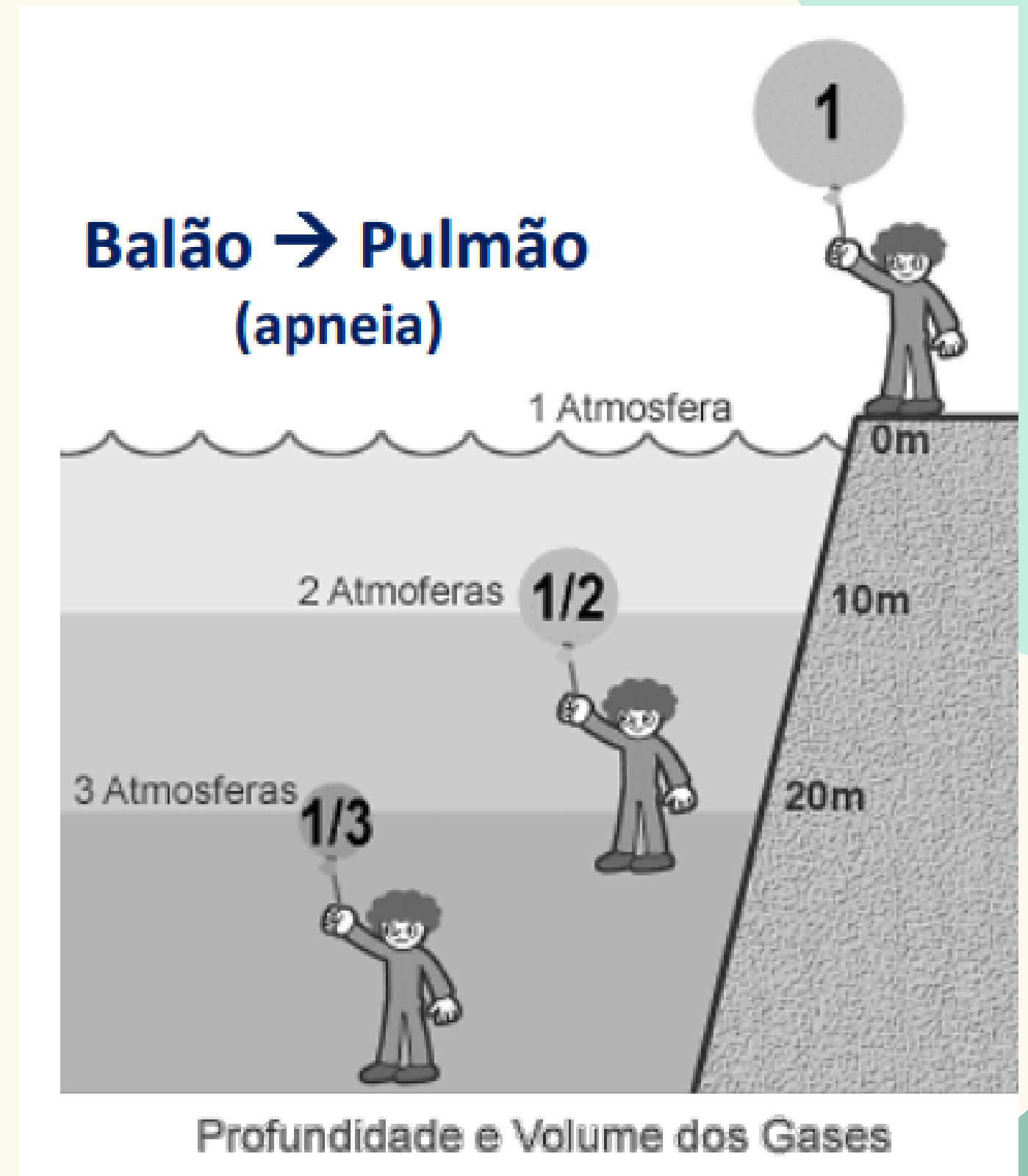
Princípios físicos

Lei de Boyle

Relação entre pressão e volume de um gás
O volume do gás é inversamente proporcional à pressão absoluta

- $\uparrow$ Pressão $\rightarrow$ $\downarrow$ Volume
- $\downarrow$ Pressão $\rightarrow$ $\uparrow$ Volume

A medida que os gases são comprimidos sua densidade aumenta



Princípios físicos

● Lei de Dalton (pressões parciais)

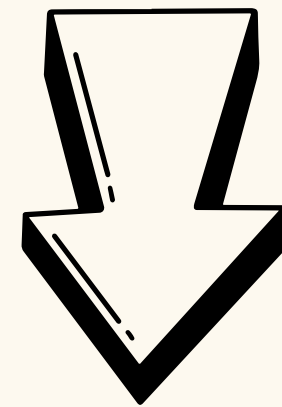
-  pressão total →  pressões parciais dos gases
- Como consequência, gases não tóxicos na superfície podem tornar-se tóxicos em maiores profundidades

● Lei de Henry (solubilidade)

-  Pressão parcial dos gases →  quantidade de gás dissolvida nos tecidos
- Quanto maior a profundidade, maior a absorção de gases pelo corpo

Imersão até o Pescoço

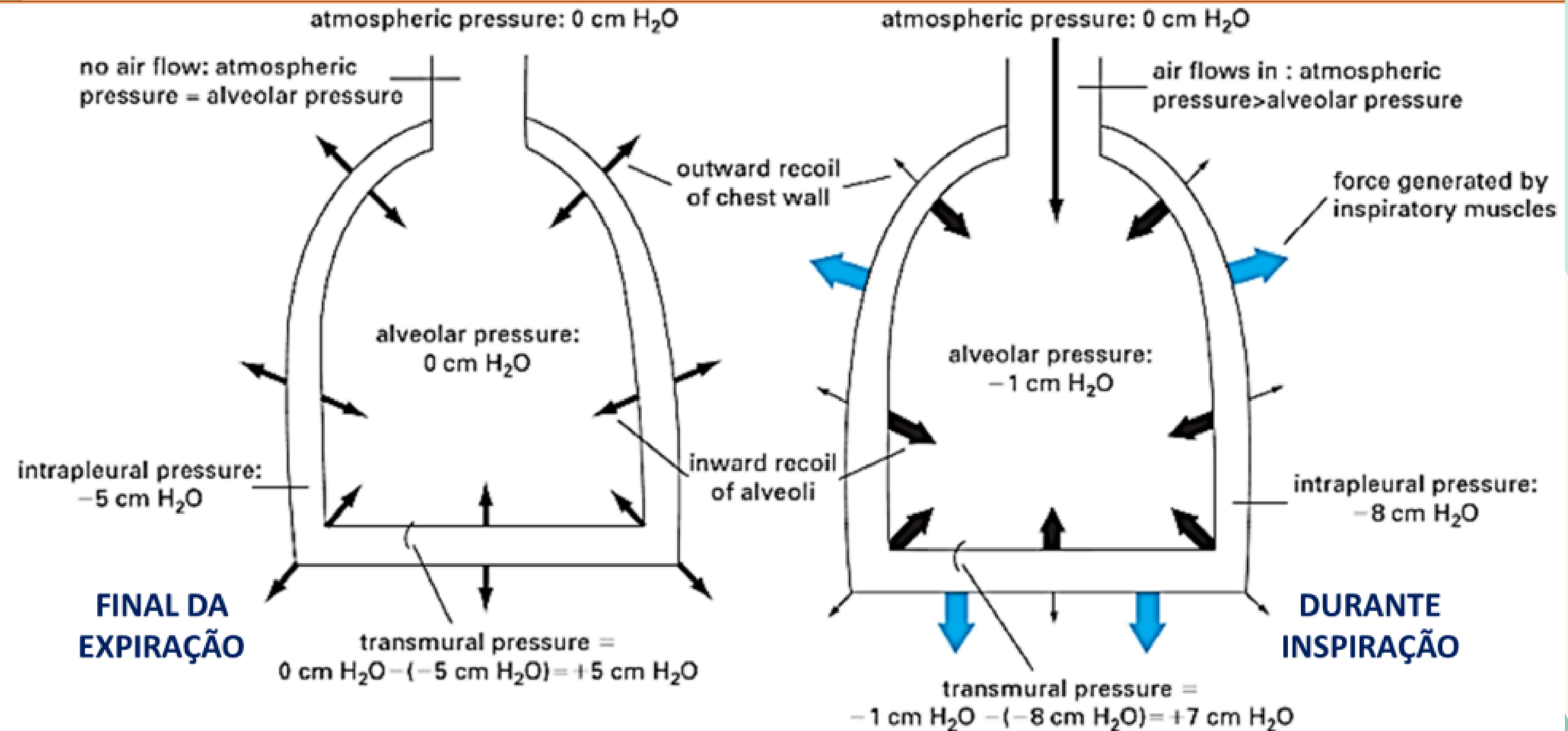
Aumento da pressão externa sobre o tórax, abdome e membros



Alterações significativas no sistema pulmonar e cardiorrespiratório



Fisiologia da respiração

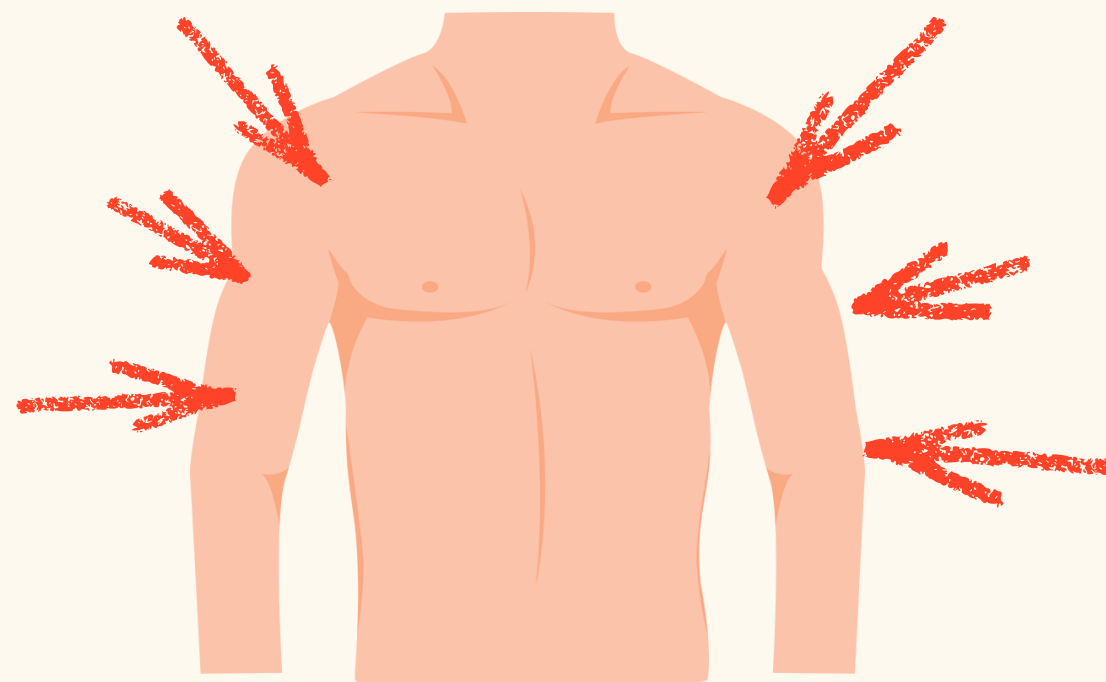


Imersão até o pescoço

Mecânica da respiração



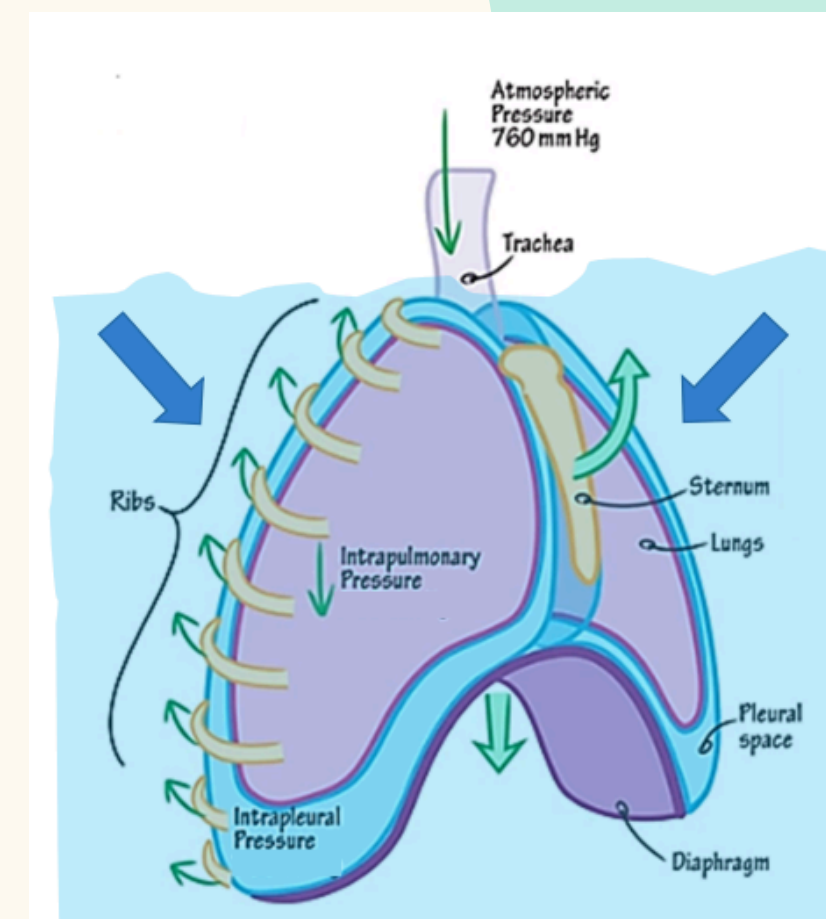
Pessoa submersa na água até o pescoço



Pressão da água sobre tórax e abdome
(20 cmH₂O maior que à atmosfera)



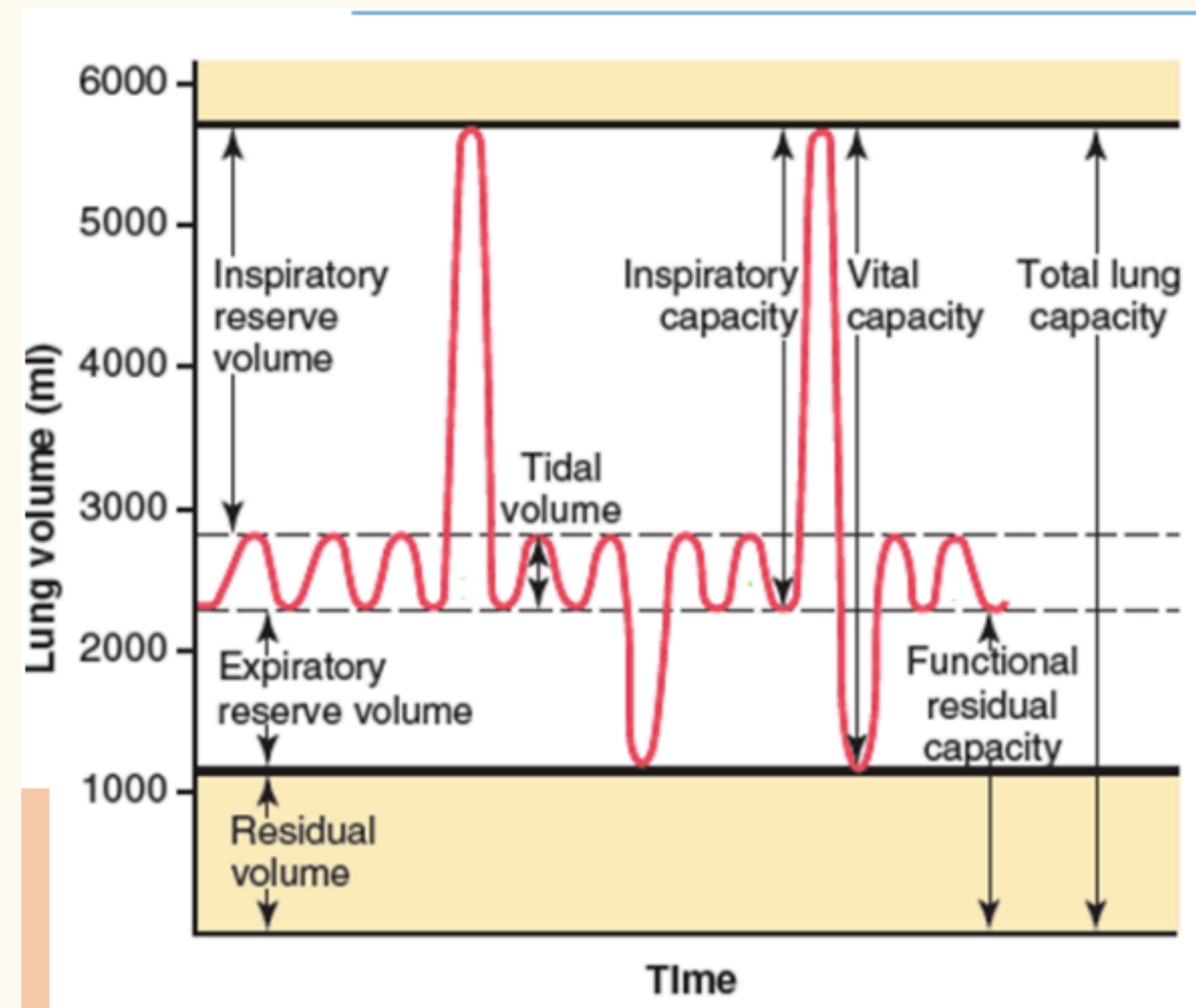
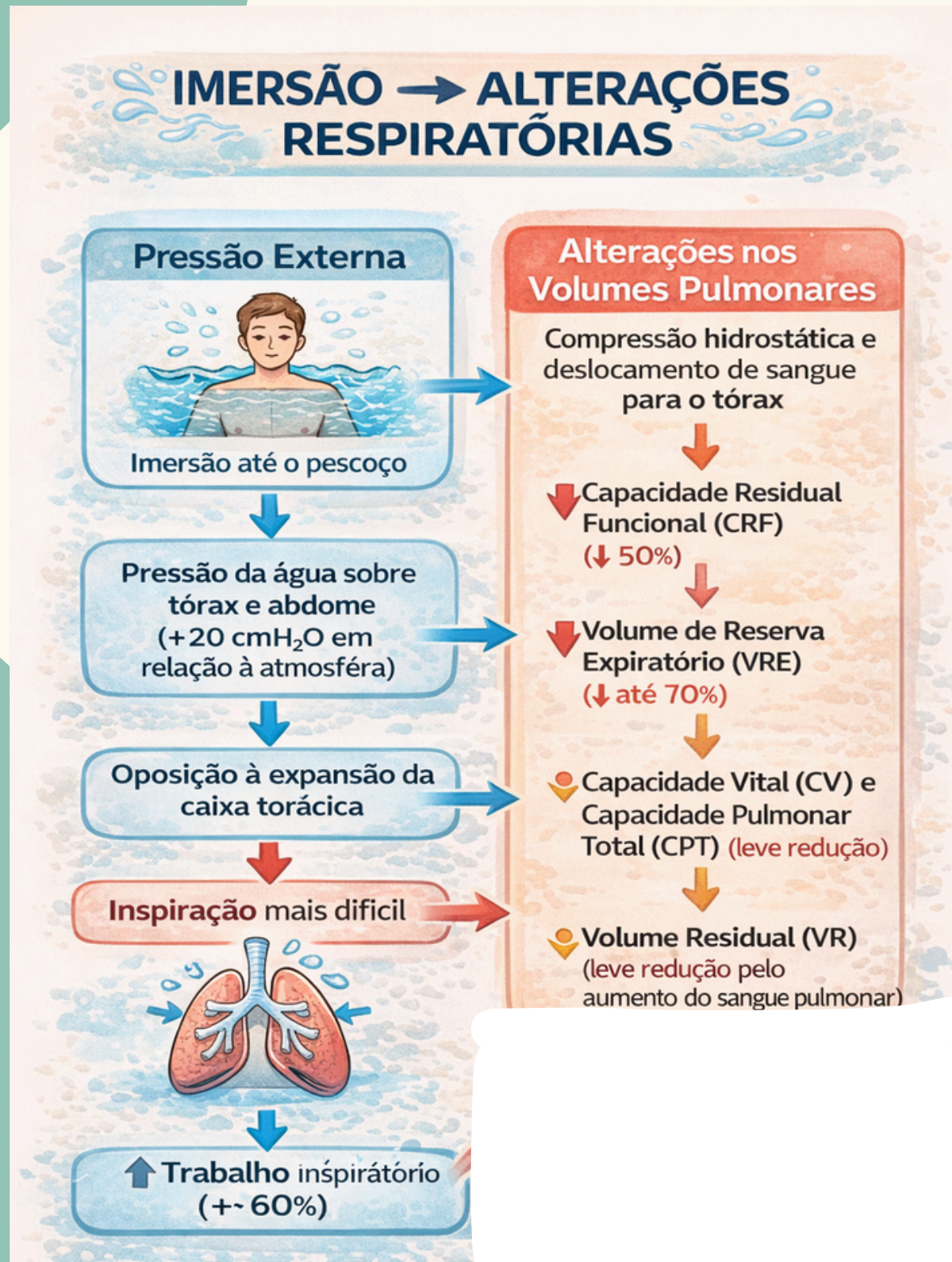
Inspiração mais difícil



trabalho inspiratório
aumenta cerca de 60%
para vencer essa
pressão positiva externa

Imersão até o pescoço

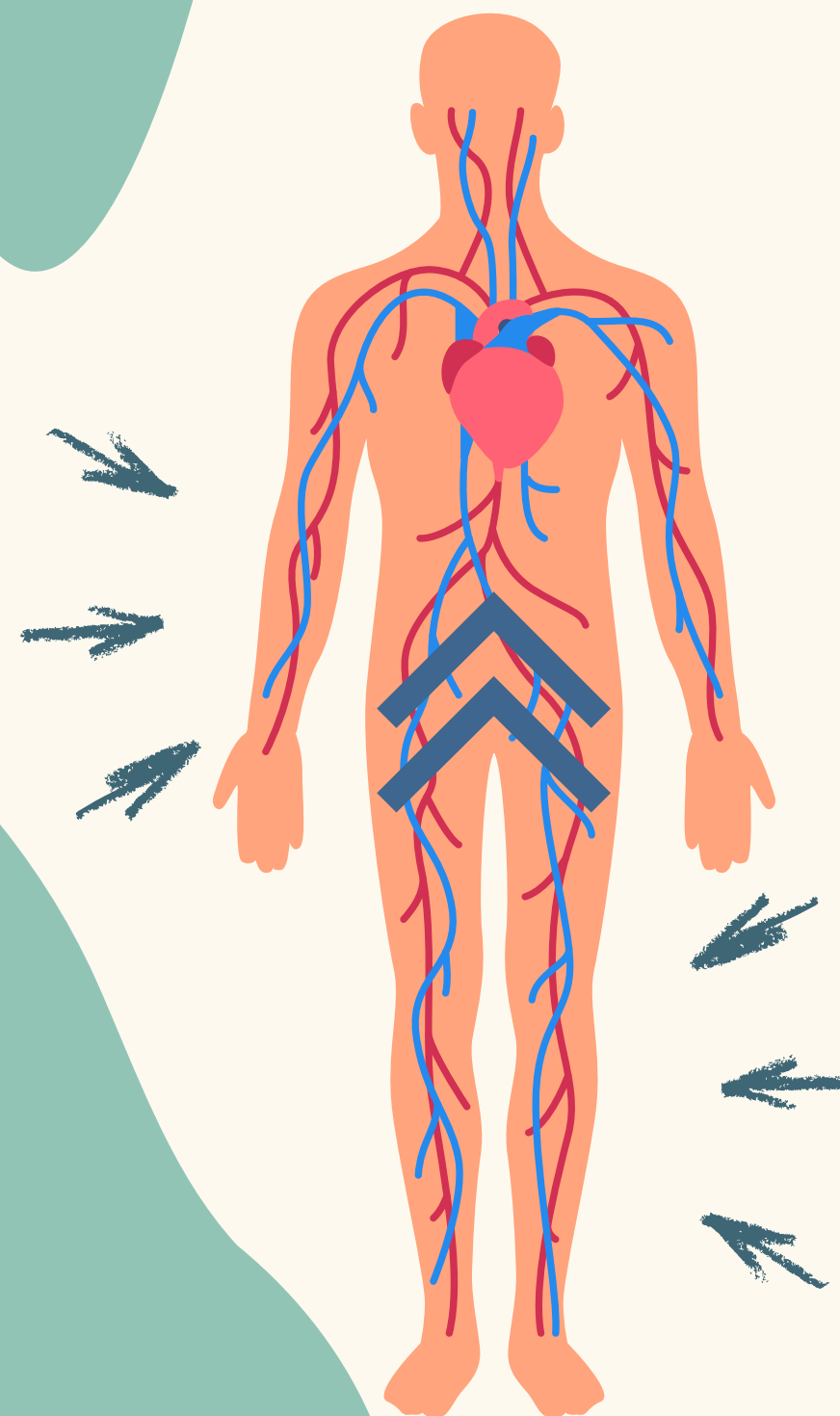
Mecânica da respiração



Imersão até o pescoço

Fluxo sanguíneo

O Deslocamento de Sangue ("Blood Shift")



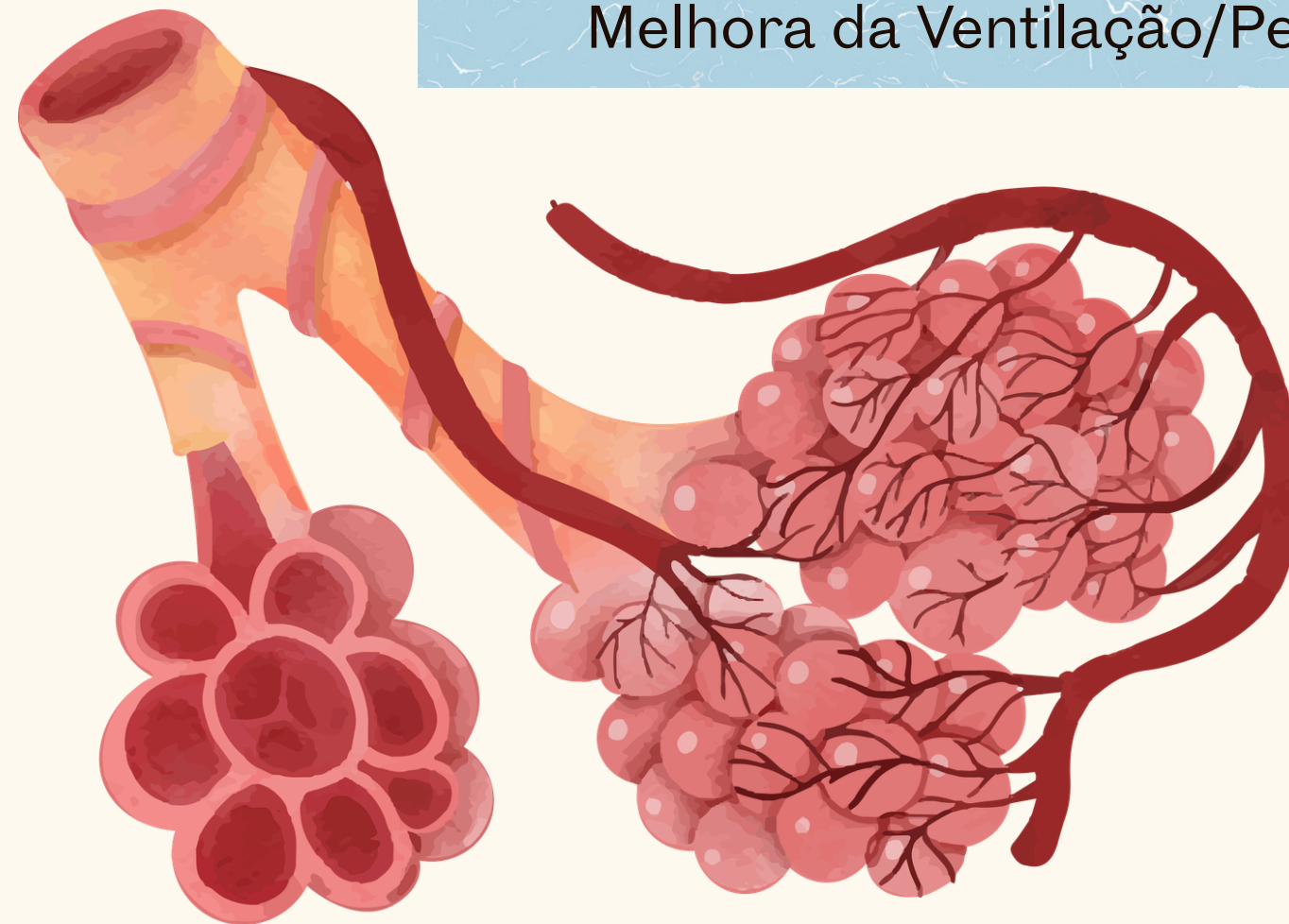
Imersão até o pescoço

Fluxo sanguíneo

↑ Aumento volume sanguíneo central (500 a 800 ml)
↑ Pressão atrial direita -2 para + 16 mmHg
↑ DC e volume sistólico em 30%

↑ Retorno venoso

↑ Recrutamento capilar
↑ Capacidade de difusão
Melhora da Ventilação/Perfusão

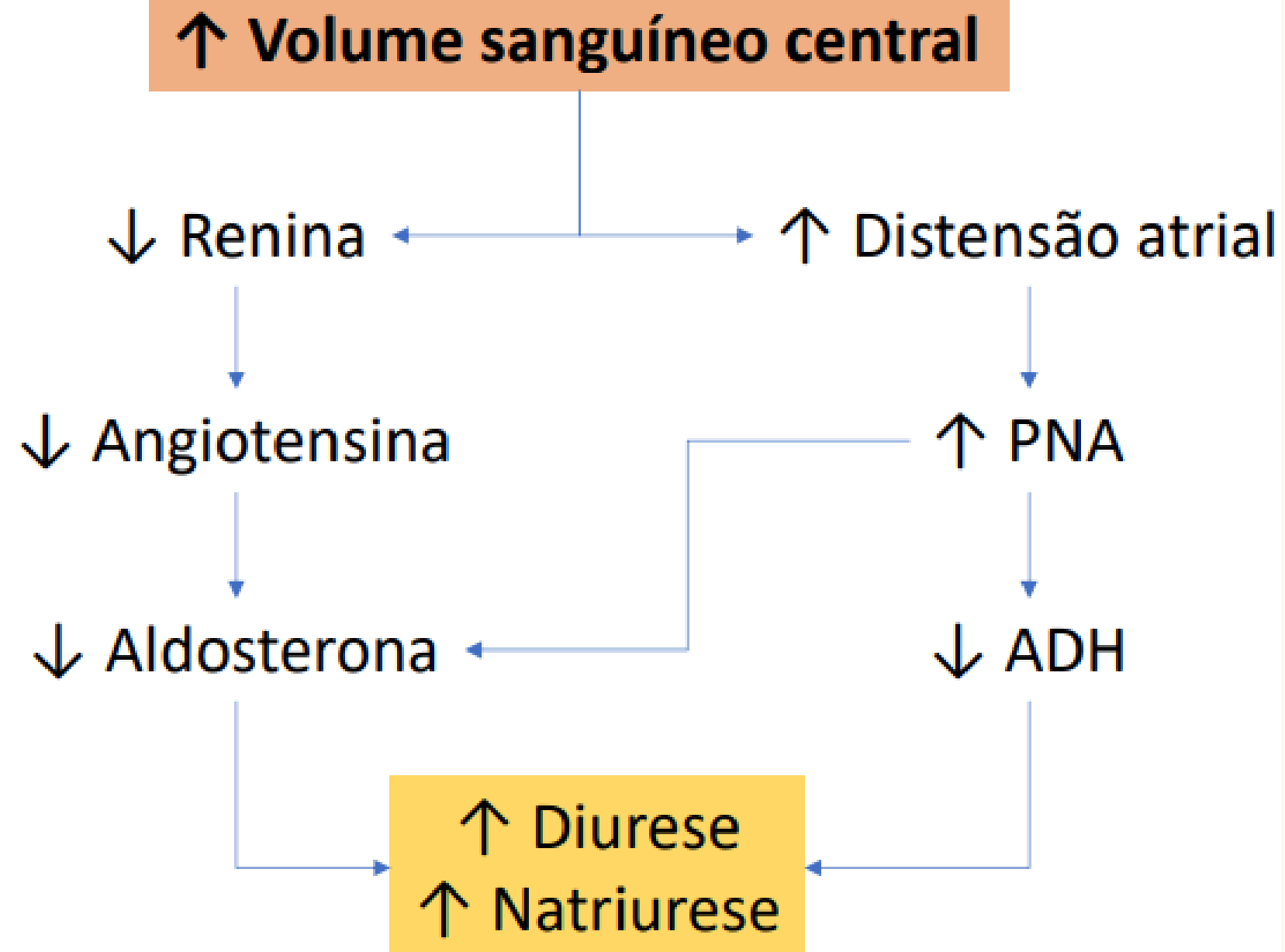


Imersão até o pescoço

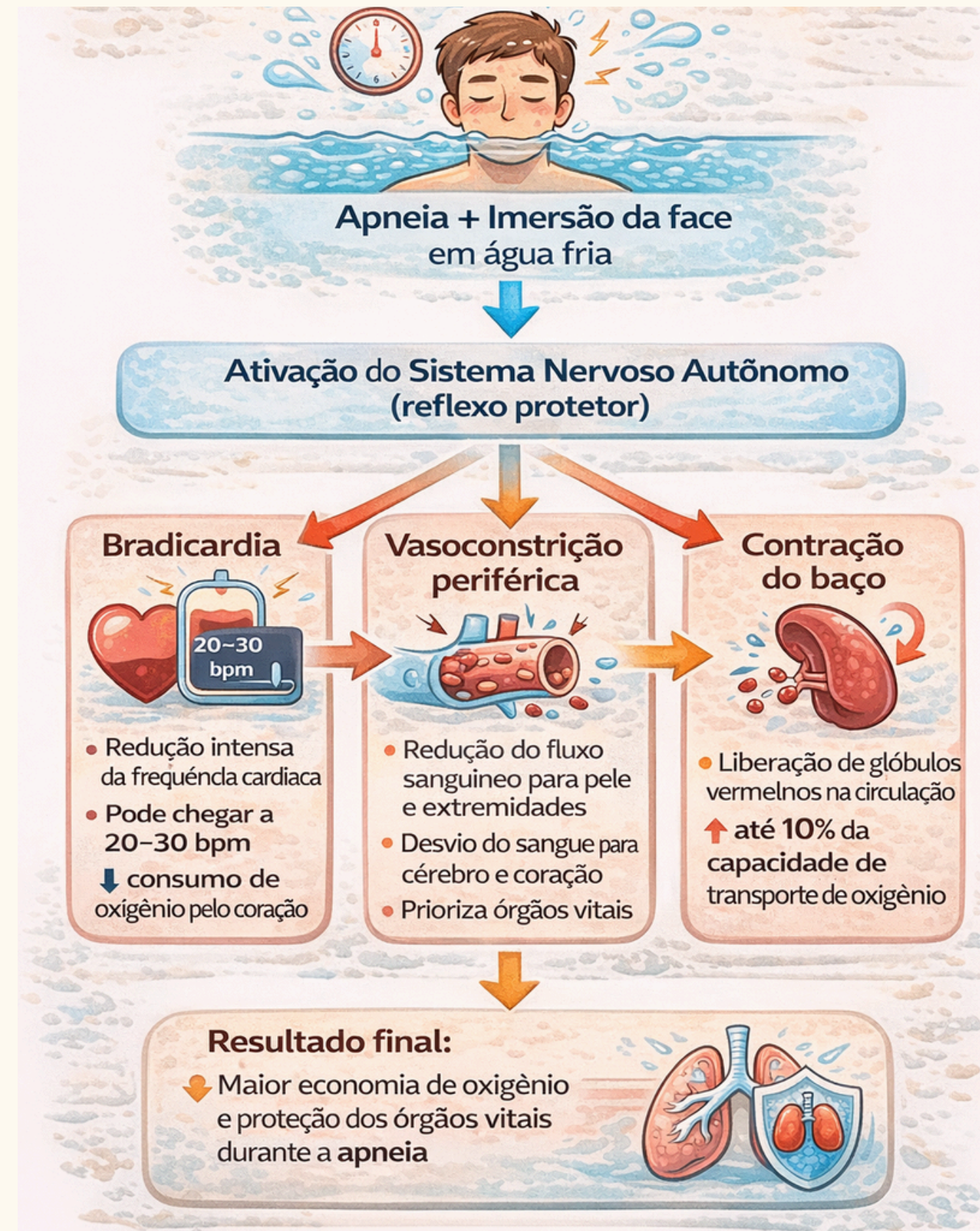
Fluxo sanguíneo

“Diurese da imersão”

Redução de 13% do
volume plasmático



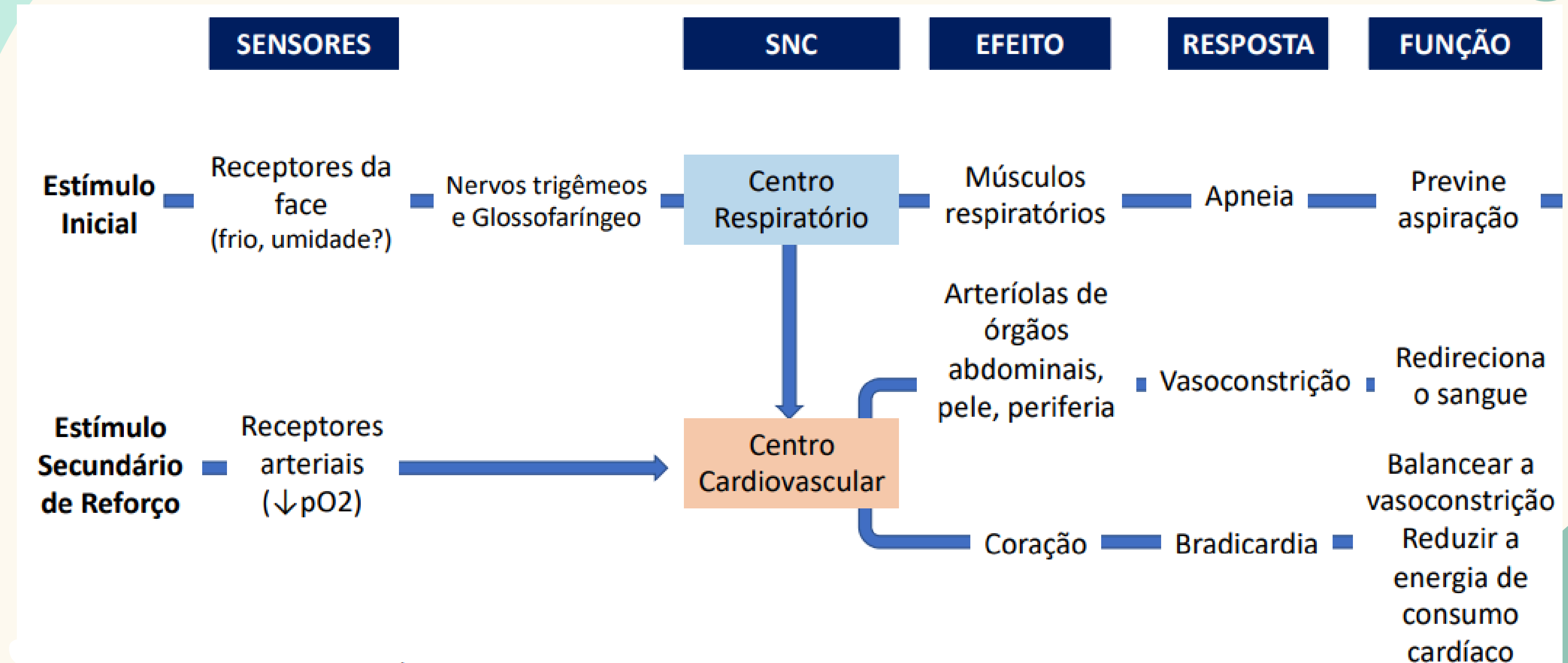
Mergulho em apneia



Reflexo do mergulho

Mergulho em apneia

Reflexo do mergulho

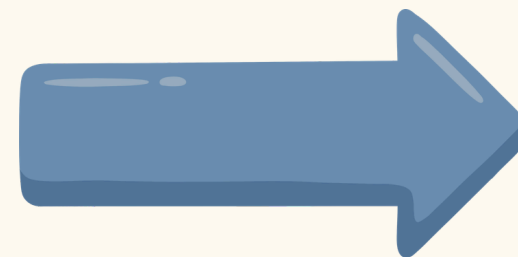


Mergulho em apneia

Dinâmica dos gases na descida

↑ Profundidade → ↓ Volume pulmonar → ↑ Gases comprimidos → ↑ Pressão dos gases

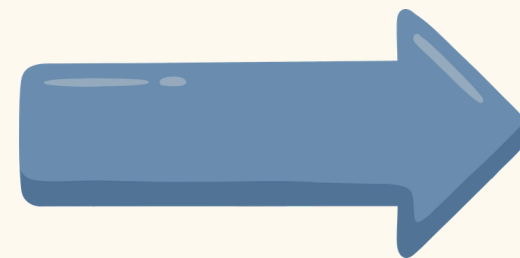
- Elevação significativa da pressão alveolar
- Redução ou inversão do gradiente de pressão parcial do CO_2 (alvéolo → sangue)



- Redução da eliminação de CO_2
- Tendência à hipercapnia

Pouco O_2 total disponível, a PO_2 elevada:

- Facilita a passagem do O_2 dos alvéolos para o sangue
- Mantém a oxigenação cerebral adequada



O mergulhador pode permanecer consciente, apesar de baixos níveis globais de O_2 .



Mergulho em apneia

Dinâmica dos gases na descida

↑ Difusão de O_2
para o sangue

Pressão
elevada

↓ Eliminação de
 CO_2

Mergulho em apneia

Dinâmica dos gases na subida

↓ Pressão ambiente -> ↑ Volume pulmonar -> ↓ Pressões parciais dos gases alveolares

O ar que estava comprimido nos pulmões durante a profundidade começa a se expandir à medida que o mergulhador se aproxima da superfície

**↓ PCO₂ -> CO₂ do sangue para o alvéolo
↓ Rápida da PO₂ alveolar -> ↓ PO₂ arterial**

“Blackout das águas Rasa”

- Perda de consciência nos últimos 5–10 m da subida
- Queda rápida da PO₂ arterial
- Privação de oxigênio cerebral antes de alcançar a superfície



Mergulho com dispositivo subaquática

- **Regulador:** fornece ar (ou mistura gasosa) sob demanda, no início da inspiração
- **Equilíbrio de pressão:** gás entregue a pressão virtualmente igual à pressão ambiente
- **Expansão pulmonar:** permite que os pulmões se expandam contra a pressão da água
- **Início do fluxo:** ocorre quando a pressão na boca cai ligeiramente abaixo da pressão ambiente

- Inspiração: O ar é fornecido através do regulador de demanda quando a pressão na altura da boca cai para pouco menos que a pressão ambiente.
- Exalação: dentro d'água (bolhas)



Mergulho com dispositivo subaquática

Trabalho inspiratório

Profundidades moderadas:

- Aumenta, mas pouco
- Gás é fornecido a pressões ambientes

Profundidades elevadas:

- Aumento da densidade de gás
- Elevação da resistência da via aérea
- Fluxo turbulento → Maior trabalho respiratório!!!

↓ Complacência pulmonar - pelo maior volume de sangue nos pulmões



Respirar devagar
Mergulhar de forma lenta e
na horizontal

Perigos e Complicações

- Barotrauma
- Doença da descompressão
- Narcose induzida pelo nitrogênio
- Toxicidade do oxigênio



Barotrauma

- Forma mais comum de lesão associada ao mergulho
- Causado pela falha de equilíbrio entre pressões
- Ocorre de acordo com a Lei de Boyle: volume do gás é inversamente proporcional à pressão

Descida (↑ pressão) →  volume do gás
Subida (↓ pressão) →  expansão do gás

- Lesões ocorrem principalmente durante a subida, pela expansão do ar

Barotrauma

Pulmão

DESCIDA
Ar comprime

- Mais comum em mergulho em apneia profunda
- Compressão pulmonar abaixo do volume residual
- Pode causar: Congestão pulmonar, Edema alveolar, Hemorragia alveolar

SUBIDA
Ar expande

- Principais causas:
 - Prender a respiração durante a subida
 - Doenças obstrutivas das vias aéreas
- Ocorre quando há aprisionamento de ar
- Expansão do ar rompe os alvéolos
- Lesões pulmonares graves: Embolia gasosa arterial, pneumotórax, pneumomediastino

Pacientes com histórico de pneumotórax espontâneo, bolhas ou doença pulmonar cística
Devem ser advertidos contra mergulho!!!

Barotrauma

Pulmão

PNEUMOMEDIASTINO

- Ruptura alveolar → gás dissecando bainha perivascular
- Sem tratamento específico
- Inalação de O₂ a 100% ajuda a reabsorver o gás extra-alveolar

PNEUMOTÓRAX

- Rompimento do parênquima para o espaço pleural
- Incomum (10% dos barotraumas pulmonares)
- A depender da profundidade → pneumotórax hipertensivo



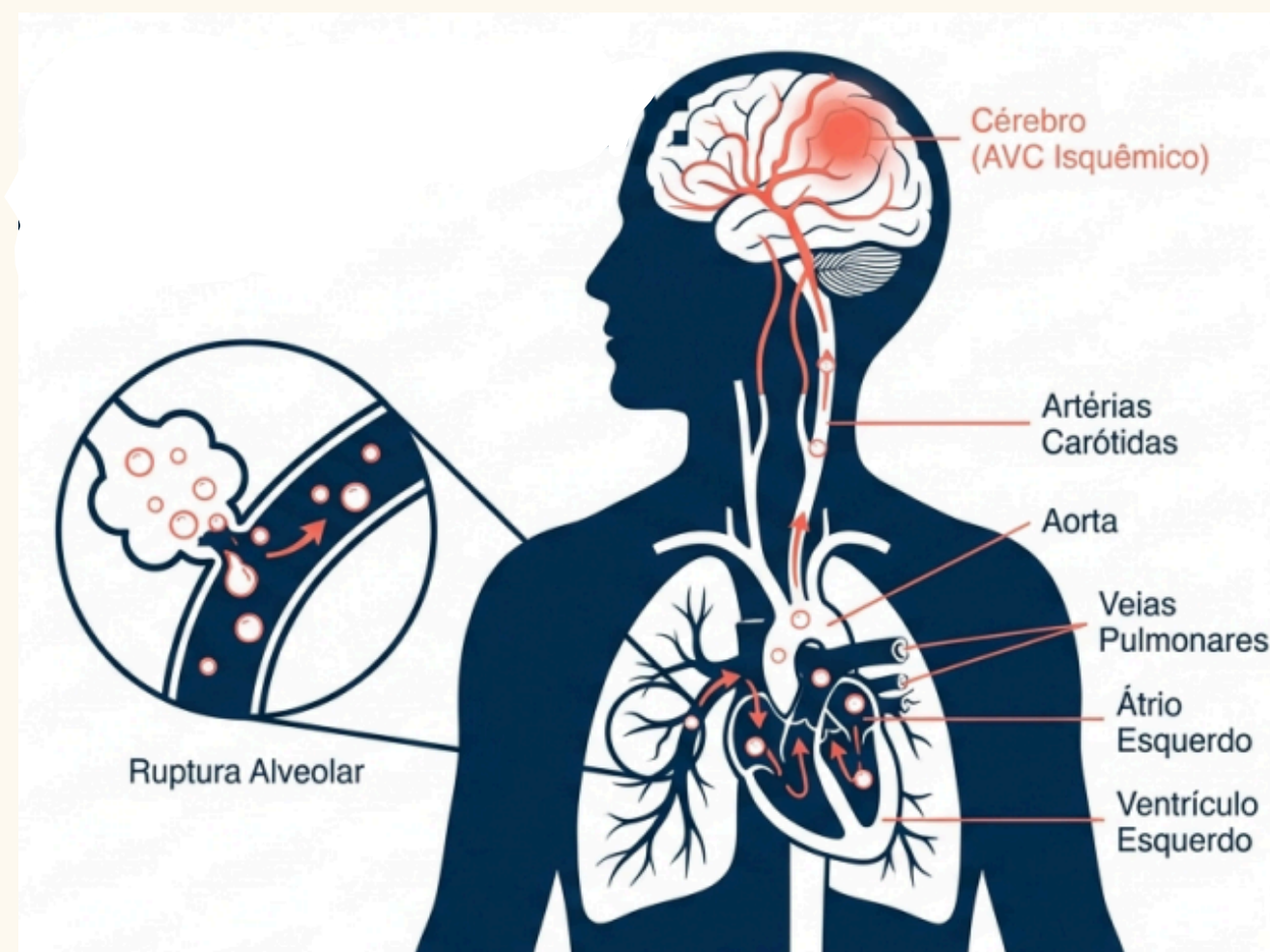
Barotrauma

Pulmão

Embolia gasosa arterial

- Lei de Boyle (subida): $\downarrow$ pressão $\rightarrow$ $\uparrow$ expansão do ar
- Ruptura alveolar:
- Entrada do gás na circulação:
 - Gás $\rightarrow$ capilares pulmonares $\rightarrow$ veias pulmonares $\rightarrow$ Lado esquerdo do coração $\rightarrow$ circulação arterial
- Via paradoxal (FOP):
 - Bolhas venosas atravessam Forame Oval Patente $\rightarrow$ embolia arterial
- Tto:
 - Administração de O₂ a 100%: amplia o gradiente de nitrogênio entre a bolha e a circulação (reabsorção)
 - Terapia hiperbárica (definitiva): Recompressão $\downarrow$ tamanho das bolhas, reabsorção do gás, oxigenação de tecidos hipóxicos

Maior risco de sequela: cerebral e coronária



Barotrauma

Orelha

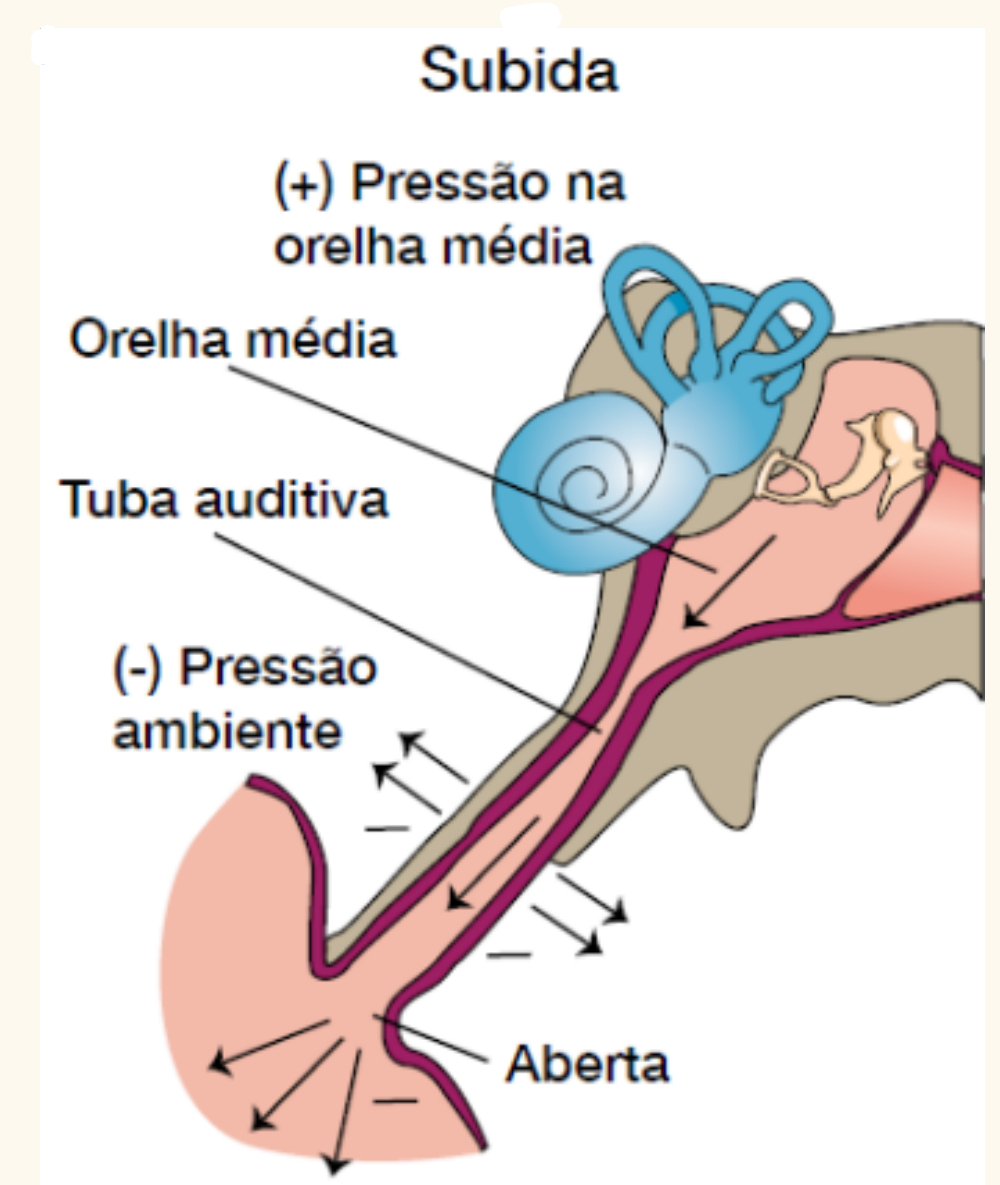
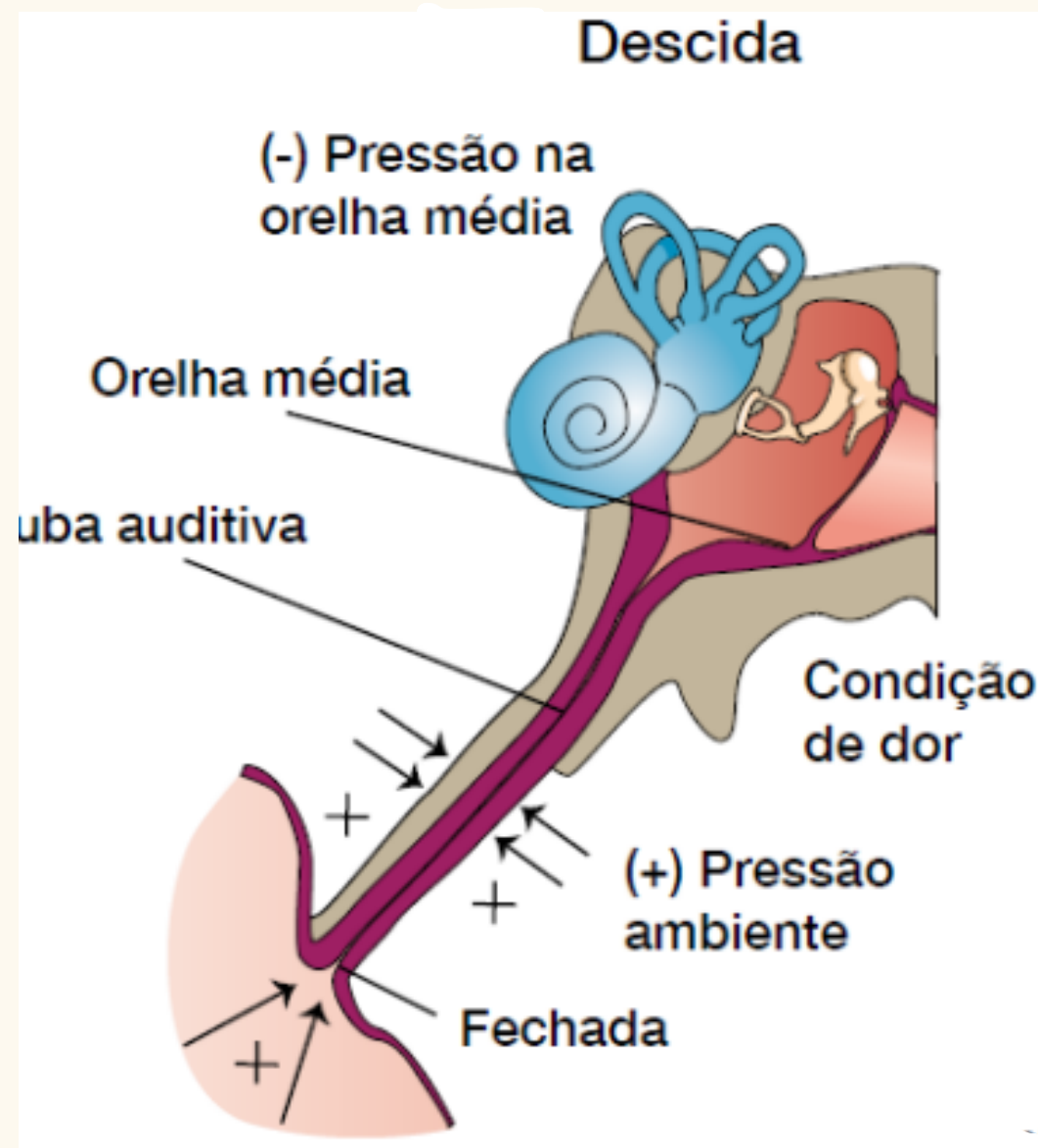
- “Aperto do Ouvido” → distúrbio mais comum entre mergulhadores

Técnicas de Equalização



Equilibrar as pressões

Movimento de Mandíbula
Manobra de Valsava



Barotrauma

Orelha



Não mergulhar quando congestionado!

IVAS ou Variações anatômicas → Obstrução da tuba auditiva = Não vai equalizar a pressão

Orelha média

A falha na equalização → tímpano empurrado para dentro
Causando dor intensa, edema de mucosa, extravasamento de fluido ou ruptura da membrana timpânica

Orelha interna

Pode ocorrer devido a manobras de Valsalva forçadas
Consequências: ruptura das janelas oval ou redonda, vertigem aguda, zumbido e perda auditiva

Incomum, porém grave!!



Barotrauma

Seios da face

Ocorre quando os óstios estão obstruídos: IVAS, alergias, pólipos nasais, variações anatômicas, sinusite

Descida

↑ pressão ambiental

- A falha na equalização → pressão negativa no interior do seio
- Consequência: dor intensa, edema da mucosa e rompimento de vasos sanguíneos

Subida

↓ pressão ambiental

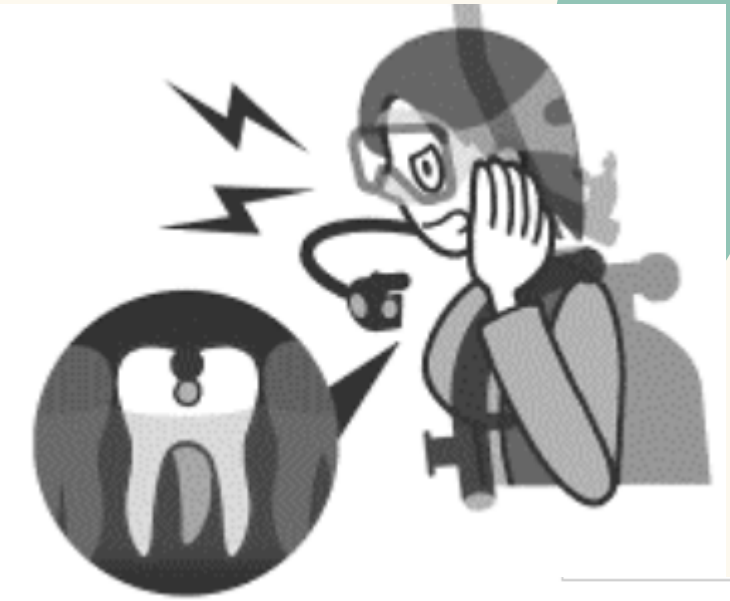
- "Bloqueio reverso": ar aprisionado se expande
- Consequência: dor severa, romper as paredes ósseas do seio.
- O seio frontal é o mais frequentemente afetado



Barotrauma

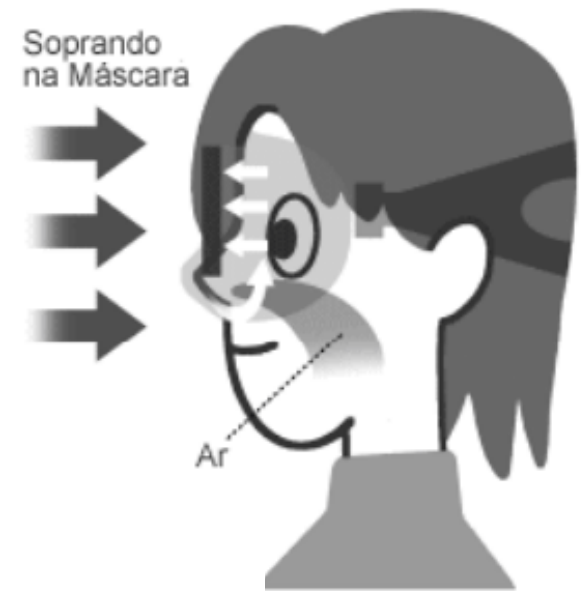
Dentário

- Pequenas cavidades de ar presas sob obturações mal ajustadas, coroas ou em canais infectados.
- Durante a subida → ar nessas cavidades se expande
- Consequências: Comprimir raízes dos dentes, dor ou até ruptura



De máscara

- Mergulhador esquece de expirar pelo nariz para dentro da máscara durante a descida
- A pressão negativa dentro da máscara "suga" os tecidos moles da face e dos olhos.
- Consequência: edema, equimoses e hemorragia subconjuntival



Pele

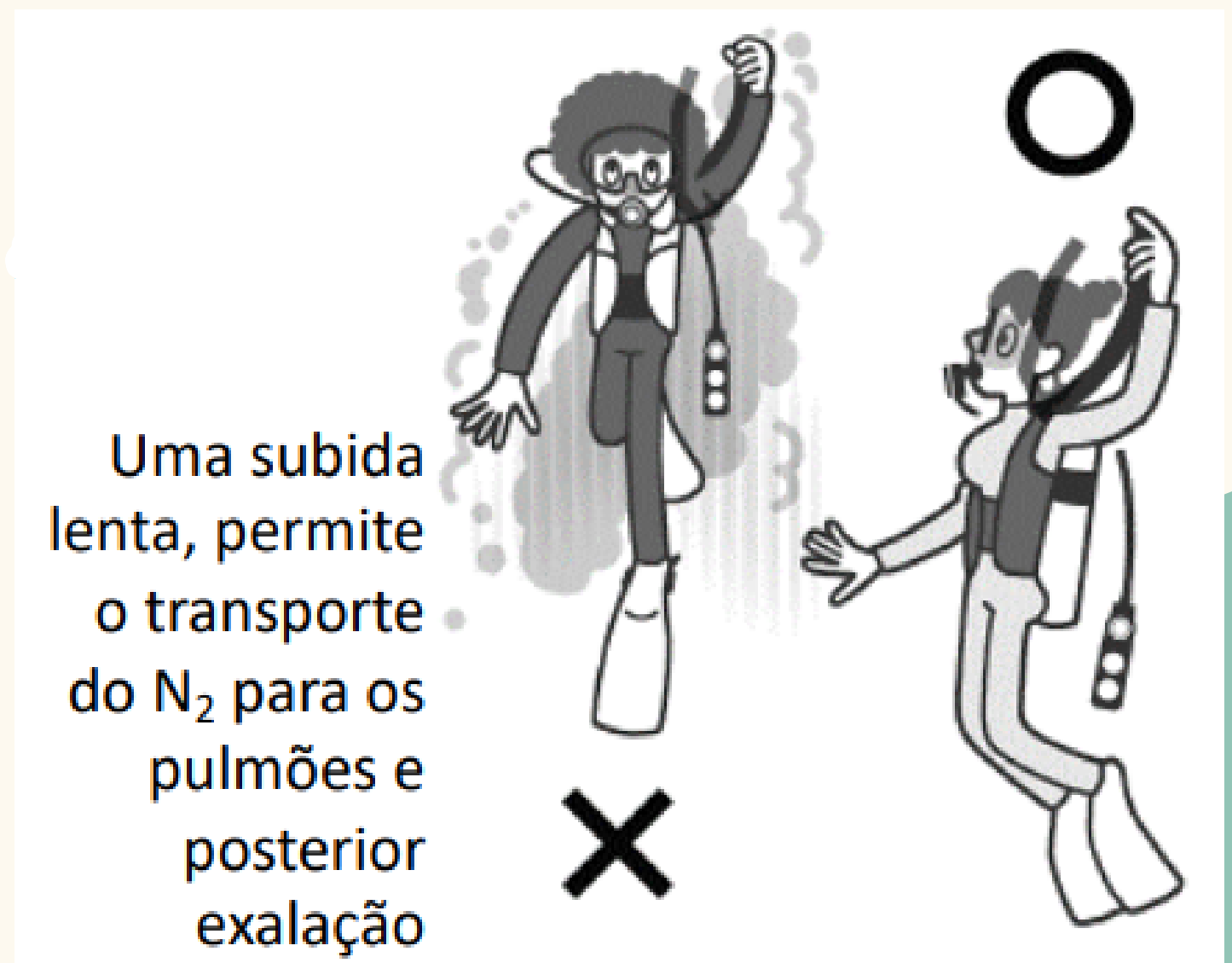
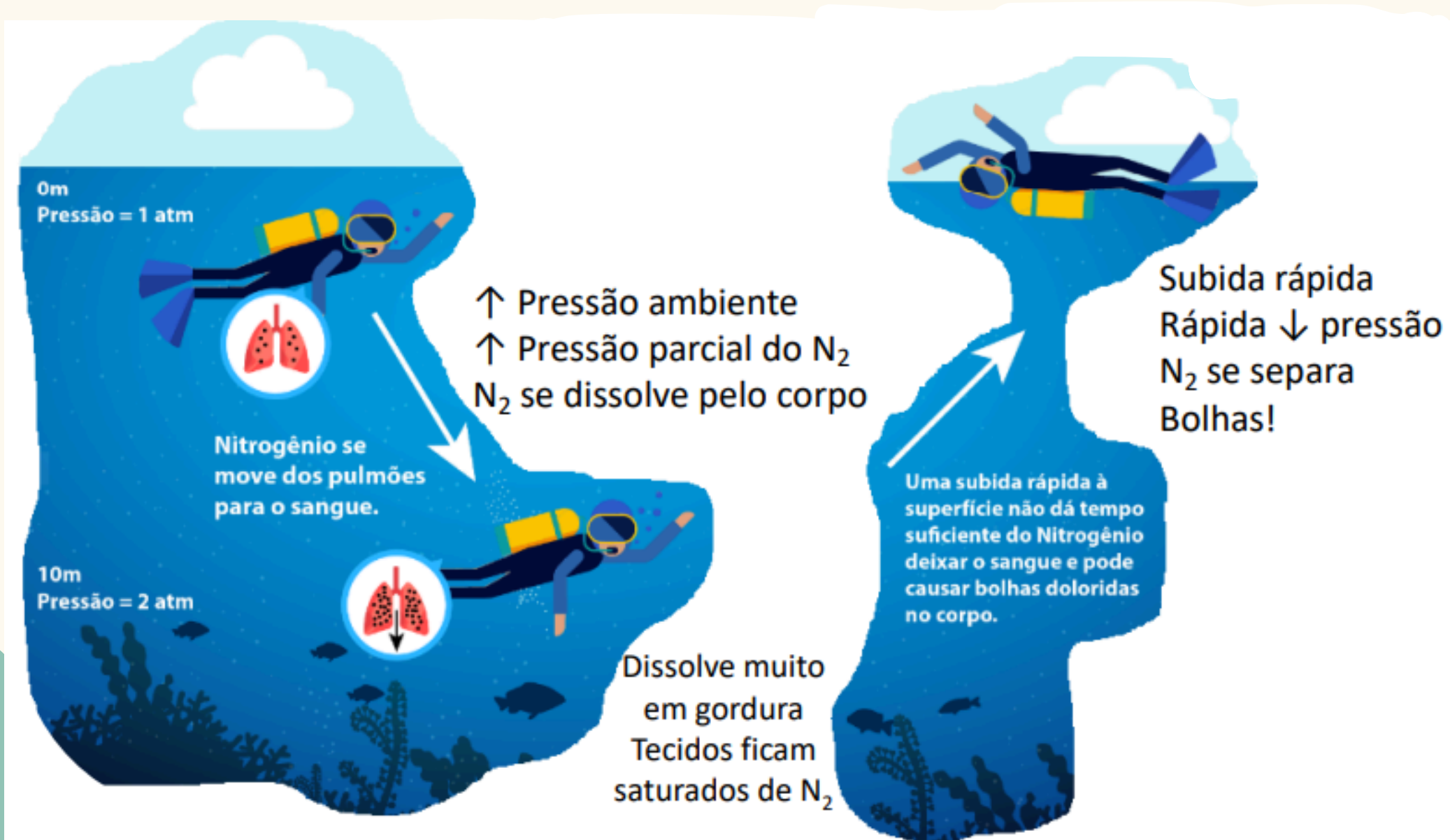
- Mergulhadores que usam traje seco (impermeáveis)
- Falta de injeção de ar no traje durante a descida
- Pressão externa comprime as dobras do traje contra a pele
- Consequência: Marcas avermelhadas e hematomas



Doença da Descompressão

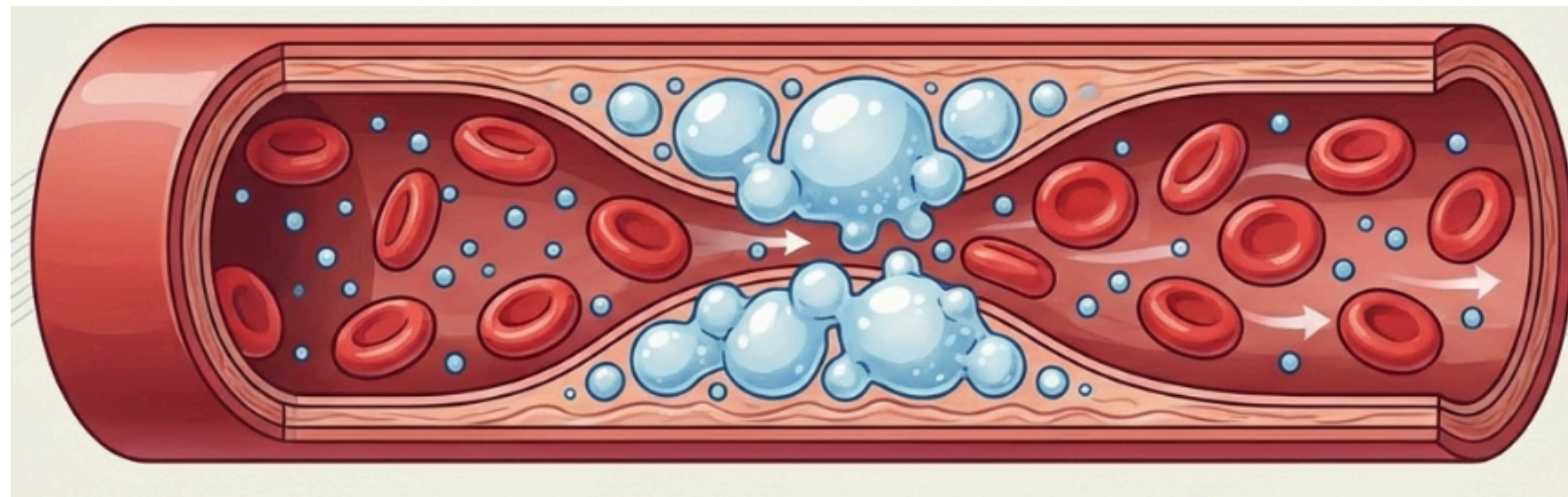
LEI DE DALTON ➤ Quando a pressão total aumenta → As pressões parciais dos gases também aumentam

LEI DE HENRY ➤ Quando as pressões parciais dos gases aumentam → As quantidades dissolvidas nos tecidos do corpo aumentam



Doença da Descompressão

- 75% desenvolvem sintomas na 1ª hora
- 90% nas primeiras 12h
- Raro iniciar após 24h
- Classificação: Tipo I e II

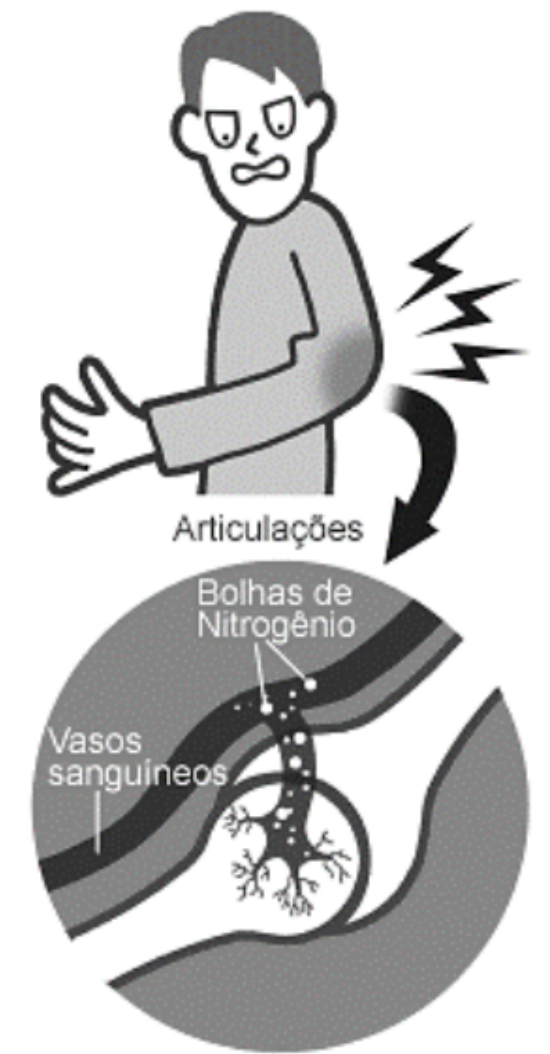


Doença da Descompressão

Classificação e Sinais Clínicos

Tipo I (Leve/Musculoesquelética)

- Articular
 - Mais comum (70-85% dos casos)
 - Dor profunda em articulações principalmente ombros e cotovelos.
- Cutânea
 - Prurido, erupções cutâneas ou pele "marmorizada" (devido a vasoespasmos).
- Linfática
 - Edema e dor em gânglios linfáticos



Doença da Descompressão

Classificação e Sinais Clínicos

Tipo II (Grave/Sistêmica)

- Neurológica
 - Bolhas na medula espinhal ou cérebro
 - Causando parestesia, fraqueza, paralisia (paraplegia), perda de memória, ataxia e distúrbios visuais.
 - Formação e coalescência de bolhas nos plexos venosos de baixa pressão → Obstrução venosa

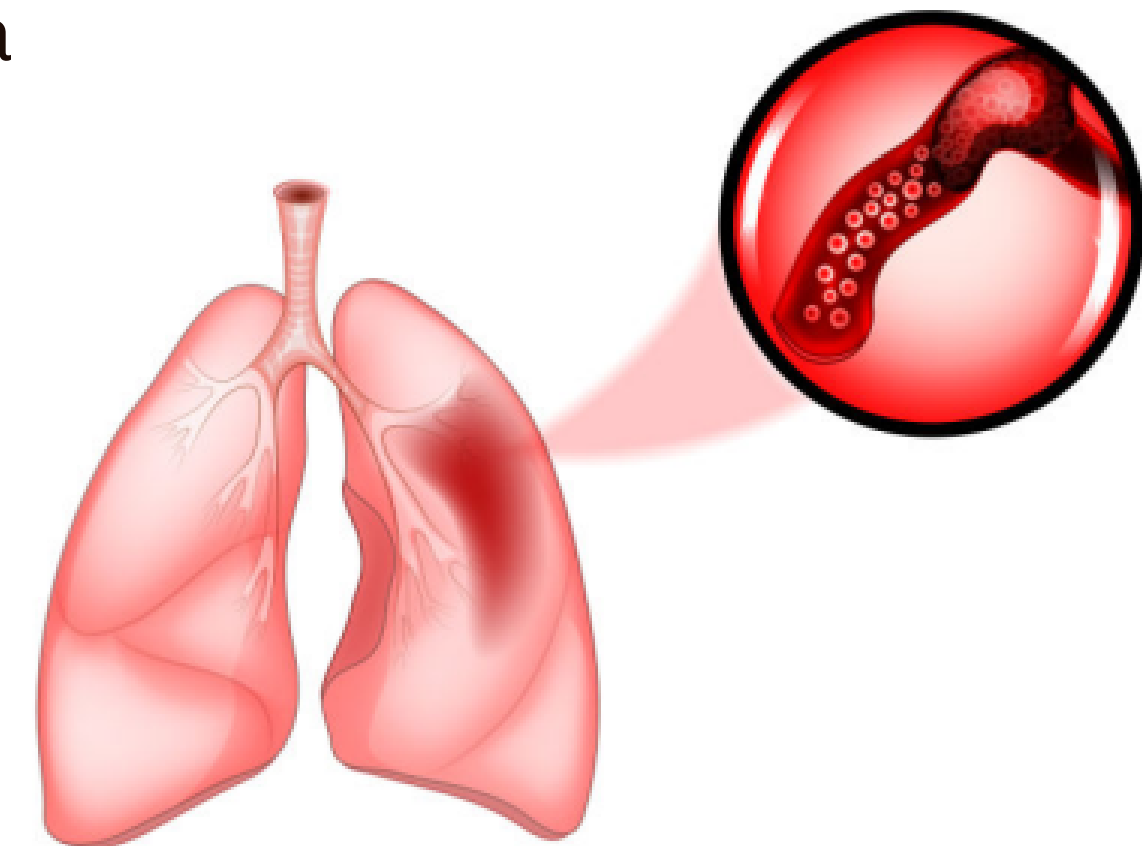


Doença da Descompressão

Classificação e Sinais Clínicos

Tipo II (Grave/Sistêmica)

- Cardiorrespiratória
 - Embolia gasosa venosa sintomática (5% dos casos)
 - Bolhas de gás obstruem a circulação pulmonar → Dor no peito, dispneia, irritação de faringe, tosse
 - Limitação da saída de VD → Insuficiência cardíaca aguda à direita
 - “Bloqueio de ar” → colapso circulatório e morte



CUIDADO!!!
Voar em aviões ou subir
altas altitudes < 12-48h pós
mergulho

Doença da Descompressão

Fatores de risco

Anatômicos

▼
FOP
CIA
CIV

**Sexo
masculino**

▼
Provavelmente ligado ao
comportamento de risco

Pessoais

▼
> 42 anos
desidratação
Falta de condicionamento
físico

Obesidade

▼
devido à solubilidade
do N₂ em gordura

Doença da Descompressão

Tratamento

A intervenção deve ser o mais precoce possível para evitar danos permanentes

- **Primeiros Socorros**

- Administração de oxigênio a 100% : ↓ gradiente de nitrogênio e acelerar a absorção das bolhas
- Hidratação vigorosa



Doença da Descompressão

Tratamento

Terapia Hiperbárica (câmara de recompressão)

- Tratamento definitivo
- Mecanismo
 - Pressão:
 - A alta pressão ↓ tamanho físico das bolhas → alivia obstrução mecânica dos vasos



Doença da Descompressão

Tratamento

Terapia Hiperbárica (câmara de recompressão)

- Oxigênio:
 - Respirando apenas oxigênio → pressão parcial do nitrogênio virtualmente zero no sangue arterial
 - Gradiente de pressão:
 - Grande diferença de pressão parcial entre o nitrogênio da bolha e o plasma
 - Efeito do gradiente:
 - Nitrogênio é transferido da bolha para o sangue
 - Resultado:
 - Absorção acelerada da bolha
 - Eliminação do nitrogênio pelos pulmões
 - Fornece O₂ aos tecidos hipóxicos



Narcose induzida por Nitrogênio

- Nitrogênio é lipossolúvel
- Durante a descida:
 - Aumento da pressão ambiente
 - Aumento da pressão parcial de nitrogênio nos alvéolos → difunde-se para o sangue e tecidos
- Efeito no organismo:
 - Alta PN_2 altera a função das membranas celulares
 - Interfere na produção e liberação de neurotransmissores
- Quanto maior a solubilidade em lipídios, maior o efeito narcótico do gás

Narcose induzida por Nitrogênio

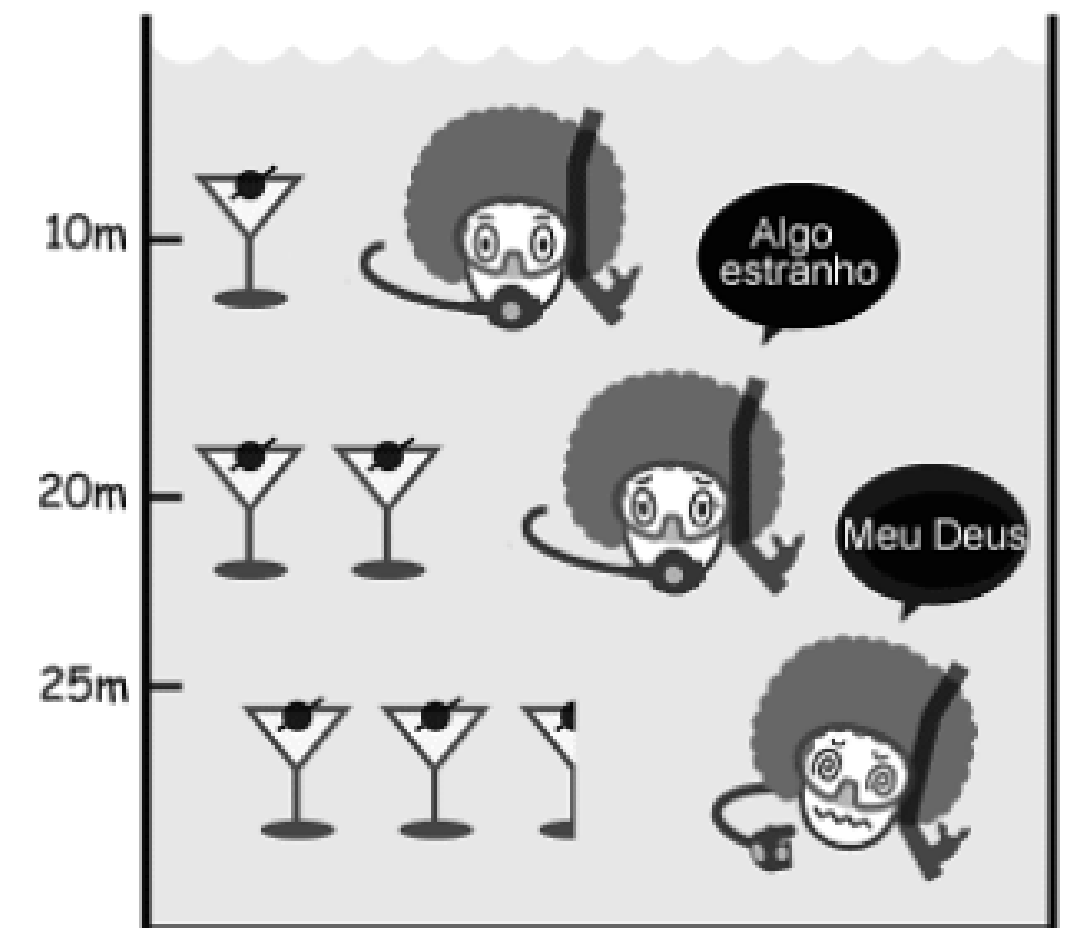
- Profundidade
 - ≥ 30 m : Euforia, desorientação, dificuldade cognitiva
 - 70–90 m: Amnésia, comportamento irracional, falta de coordenação
 - > 90 –100 m: Efeito anestésico, alucinações, perda de consciência
- Recuperação:
 - Redução da PN_2 ao subir para menores profundidades
 - Regressão rápida dos sintomas
 - Possível atraso na recuperação neurossensorial
 - Alterações visuais podem persistir até 30 min na superfície
- Misturas gasosas:
 - Uso de Hélio em mergulhos profundos
 - Dilui o oxigênio (Heliox / Trimix)
 - Hélio não é narcótico (baixa solubilidade lipídica)

“

Fatores de risco

- Hipercapnia, hipotermia, fadiga, consumo de álcool e medicamentos (como o sildenafil)

”



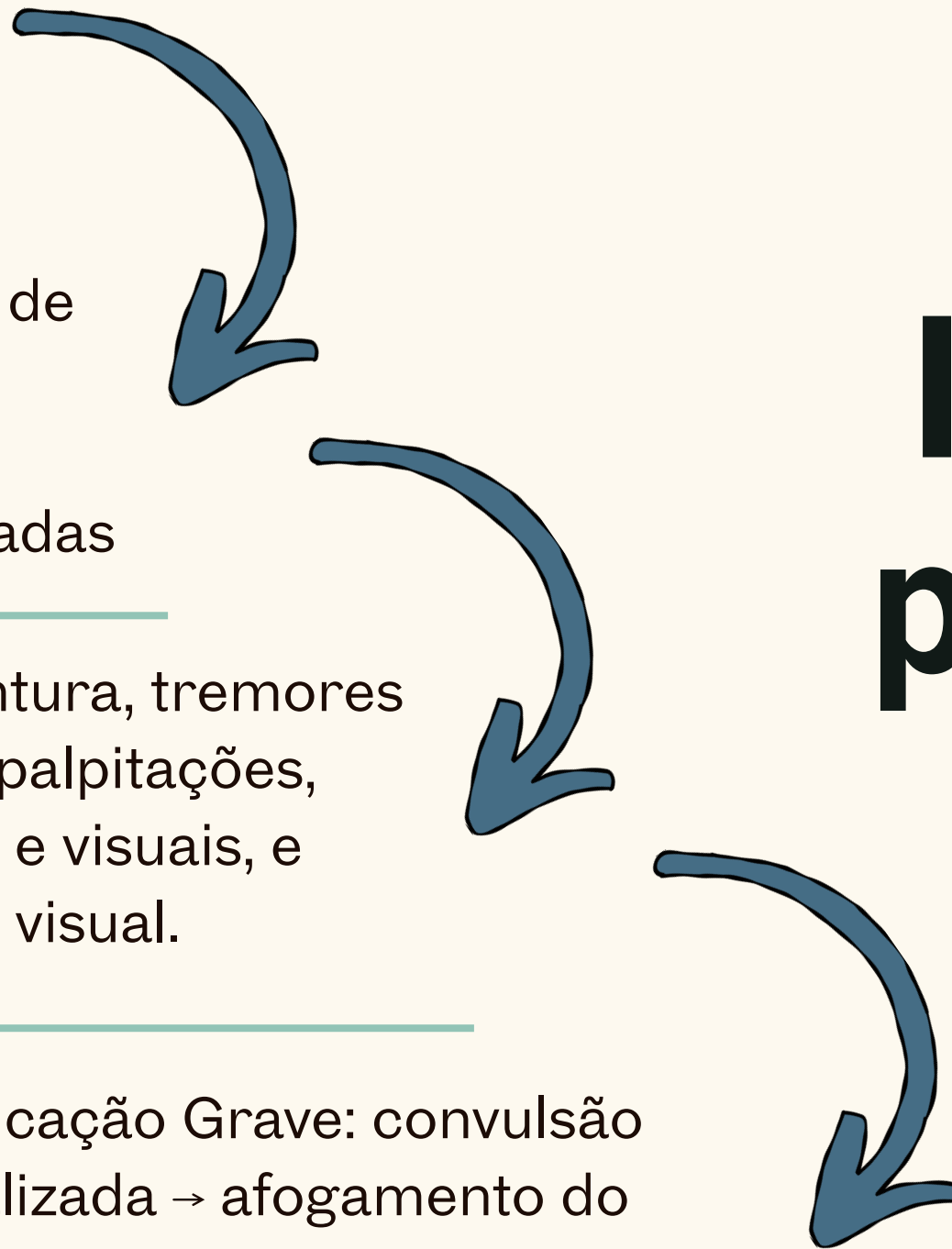
Oxigênio a 100% ou exposições a pressões elevadas (aumenta Pressão parcial)

Mecanismo: Produção excessiva de radicais livres
Consequência:
Defesas antioxidantes são superadas

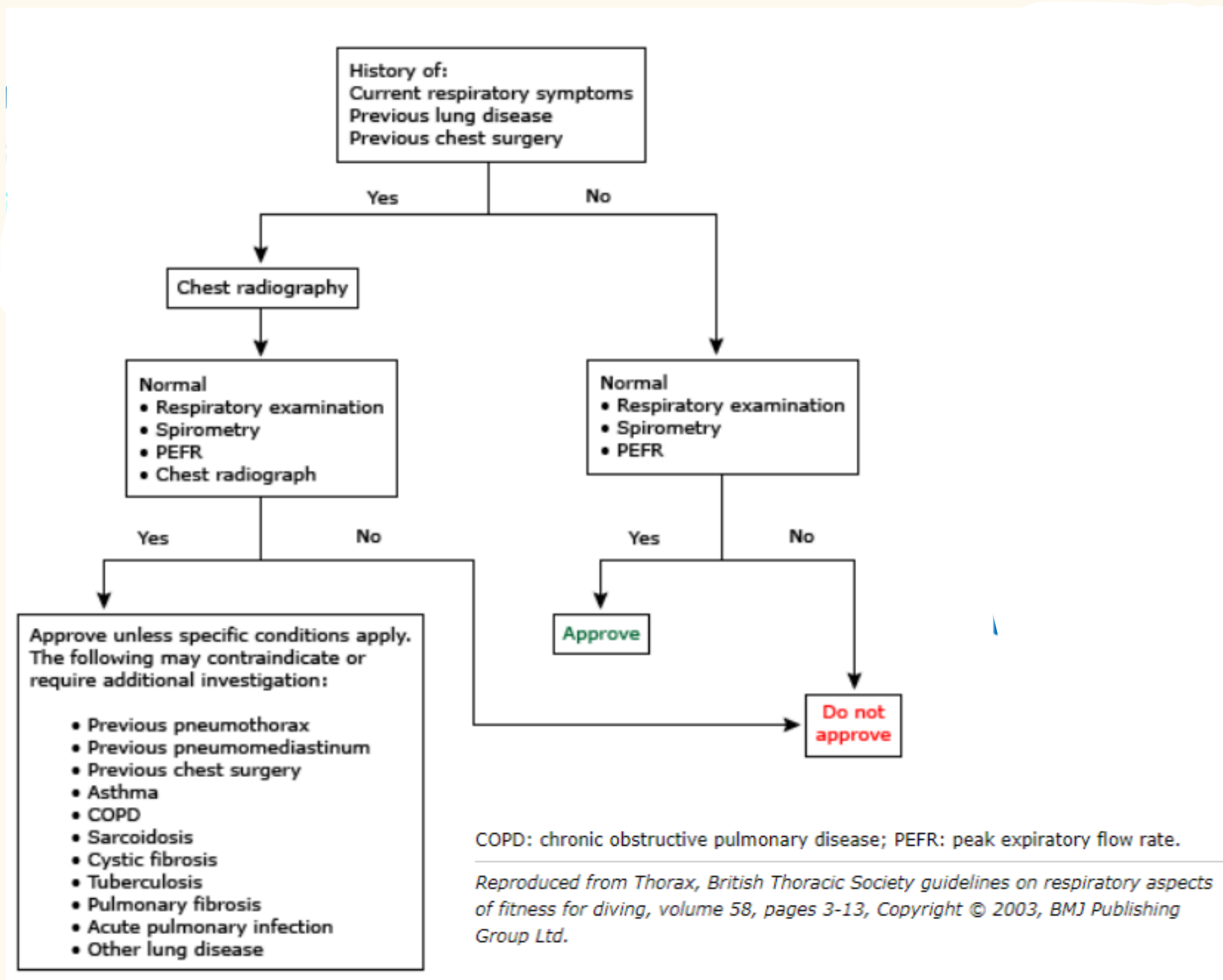
Náuseas, vômitos, tontura, tremores musculares (faciais), palpitações, alucinações auditivas e visuais, e constrição do campo visual.

Complicação Grave: convulsão generalizada → afogamento do mergulhador

Intoxicação por oxigênio



Mergulho em condições especiais



Mergulho em condições especiais

DOENÇA PULMONAR

Obstrutiva crônica, bolhas, cistos pulmonares, fibrose cística, sarcoidose, fibrose pulmonar ou histórico de pneumotórax ou pneumomediastino devido a qualquer causa

Contraindicação absoluta!

Asma ativa → fortemente desencorajado

- Diabetes Mellitus:
 - Dependentes de insulina: excluídos de mergulho militar/comercial
 - Mergulho recreativo: permitido com treinamento especial
 - Foco no controle glicêmico e prevenção de hipoglicemia
- Gravidez:
 - Exige avaliação criteriosa
 - Mergulho geralmente contraindicado
 - Risco descompressivo ao feto
- Fobias e Hérnias:
 - Fobias graves: contraindicação
 - Hérnia inguinal não reparada: contraindicação

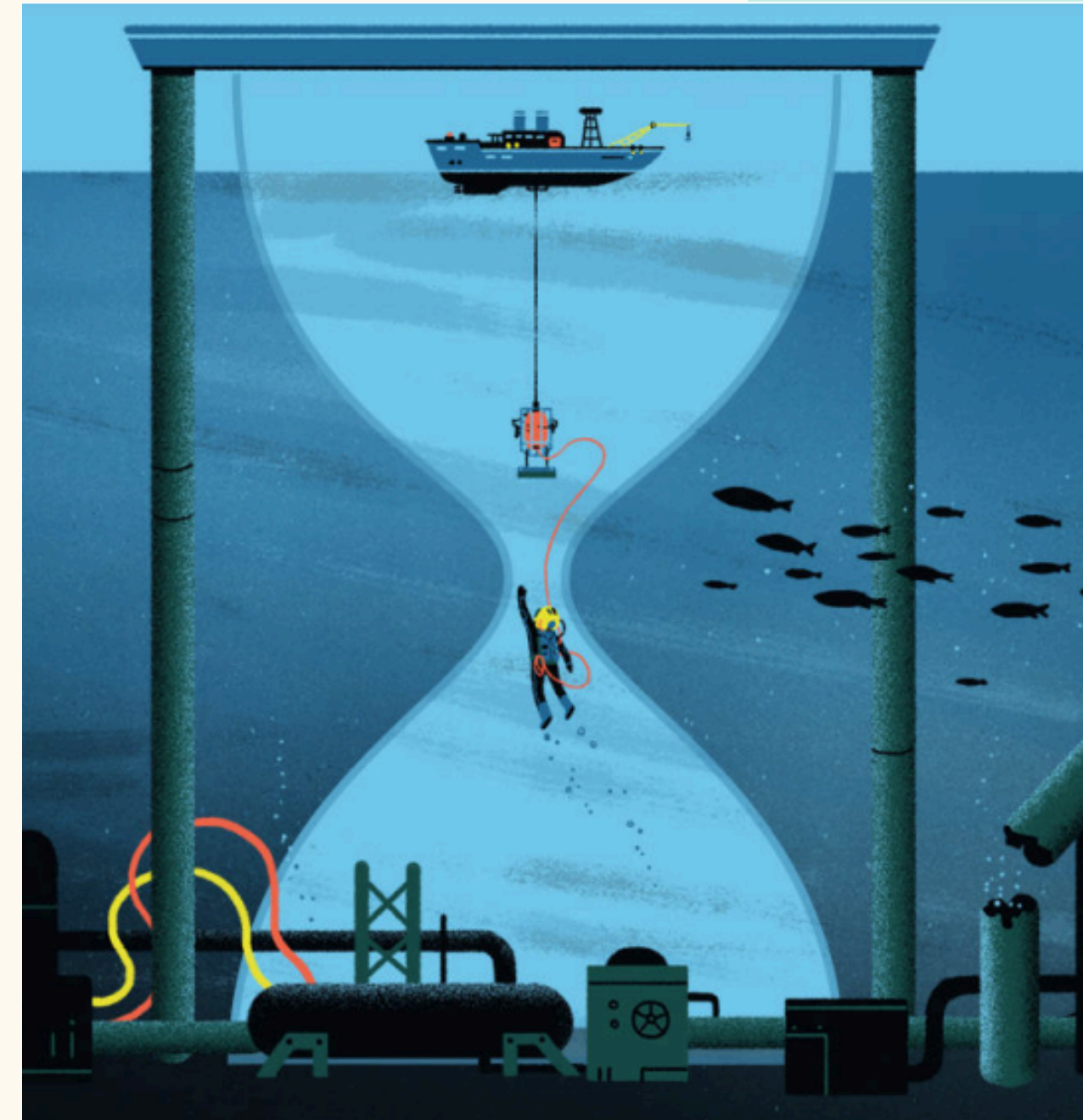
Mergulho de Saturação

- Geralmente realizado para fins comerciais (plataformas de petróleo) ou militares,
- Profundidades extremas (ex: 300m) e condições ambientais severas
- Conceito de Saturação:
 - Exposição prolongada à alta pressão (12–24 h)
 - Tecidos entram em equilíbrio com a pressão ambiente
- Limite de gás:
 - Após a saturação, não há maior absorção de gás inerte
 - Tempo extra na profundidade não aumenta a carga de gás
- Vantagem operacional:
 - Permite múltiplas incursões de trabalho
 - Tempo de descompressão não aumenta
 - Corpo já está saturado de gás



Mergulho de Saturação

- Mergulhadores de saturação não retornam à superfície após o turno.
- Habitat: câmaras hiperbáricas seladas em navios ou plataformas, mantidas na mesma pressão do fundo do mar.
- Capacidade: cada câmara abriga 4 pessoas.
- Infraestrutura: comunicação e suprimento de gases controlados pela superfície.
- Transferência ao trabalho: usam sino de mergulho pressurizado para chegar à profundidade e retornar ao habitat.



Mergulho de Saturação

- Ar comum não é usado em grandes profundidades: risco de toxicidade do oxigênio e narcose por nitrogênio.
- Hélio (Heliox) é o gás preferido:
 - 3× mais difusível que o nitrogênio.
 - Menos solúvel em gorduras → reduz narcose e esforço respiratório.
- Desvantagem: alta condutividade térmica → maior perda de calor → risco de hipotermia.
- Medida de segurança: aquecimento de gases e roupas de mergulho.



Mergulho de Saturação

Retorno à superfície



- Fase mais complexa e demorada
- Risco: tecidos saturados → descompressão lenta para evitar bolhas (doença descompressiva).
- Regra geral: ~24 h de descompressão a cada 30 m de profundidade.
- Exemplo: mergulho a 300 m → ~11 dias de descompressão contínua em câmara antes de sair para o ar.



Referências

1. VAN OOIJ, Pieter-Jan A.M.; STERK, Peter J.; VAN HULST, Robert A. "Oxygen, the lung and the diver: friends and foes?". European Respiratory Review, v. 25, n. 141, p. 496-505, 2016.
2. BOSCO, Gerardo; RIZZATO, Alex; MOON, Richard E.; CAMPORESI, Enrico M. "Environmental Physiology and Diving Medicine". Frontiers in Psychology, v. 9, art. 72, p. 1-10, 2018.
3. PATRICIAN, Alexander; DUJIĆ, Željko; SPAJIĆ, Boris; DRVIŠ, Ivan; AINSLIE, Philip N. "Breath-Hold Diving – The Physiology of Diving Deep and Returning". Frontiers in Physiology, v. 12, art. 639377, p. 1-11, 2021.
4. BOVE, Alfred A. "Diving Medicine". American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, v. 189, n. 12, p. 1479-1486, 2014.
5. WILMSHURST, Peter. "ABC of oxygen: Diving and oxygen". BMJ, v. 317, p. 996-999, 1998.
6. HELD, Heather E.; PENDERGAST, David R. "Relative effects of submersion and increased pressure on respiratory mechanics, work, and energy cost of breathing". Journal of Applied Physiology, v. 114, n. 4, p. 578-591, 2013.
7. MOON, R. E.; CHERRY, A. D.; STOLP, B. W.; CAMPORESI, E. M. "Pulmonary gas exchange in diving". Journal of Applied Physiology, v. 106, n. 2, p. 668-677, 2009

Obrigada!

