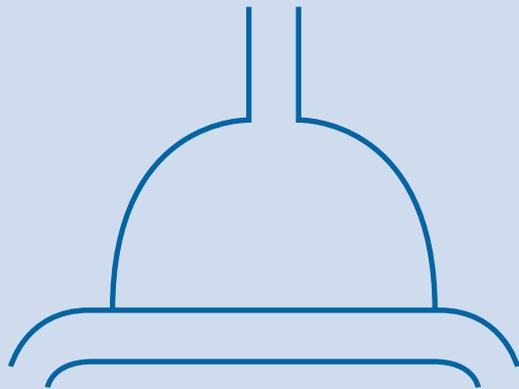


1 ESTRUTURA E FUNÇÃO



Como a arquitetura pulmonar garante a sua função

Iniciaremos com uma revisão das relações entre estrutura e função pulmonar. Primeiro, veremos a membrana alvéolo-capilar, onde ocorre a troca dos gases respiratórios. Depois, veremos como o oxigênio atinge essa membrana através das vias aéreas e, então, como o sangue remove o oxigênio dos pulmões. Por fim, dois potenciais problemas dos pulmões serão abordados brevemente: como o alvéolo mantém a sua estabilidade e como o pulmão é mantido limpo em um ambiente poluído.

- ▶ Membrana alvéolo-capilar
- ▶ Vias aéreas e fluxo aéreo
- ▶ Vasos e fluxo sanguíneos
- ▶ Estabilidade alveolar
- ▶ Remoção de partículas inaladas

O pulmão existe para realizar a troca gasosa. Sua função primária é permitir que o oxigênio se mova do ar até o sangue venoso e que o dióxido de carbono faça o movimento contrário. O pulmão também realiza outras funções. Metaboliza alguns compostos, filtra materiais não desejados da sua circulação e age como um reservatório para o sangue. Entretanto, a sua função cardinal é trocar gases. Portanto, abordaremos inicialmente a membrana alvéolo-capilar, onde ocorre a troca gasosa.

► MEMBRANA ALVÉOLO-CAPILAR

O oxigênio e o dióxido de carbono se movem entre o ar e o sangue por difusão simples, isto é, de uma área de pressão parcial alta para outra de pressão parcial baixa,* assim como a água flui morro abaixo. A lei de Fick (da difusão) afirma que a quantidade de gás que se move através de uma lâmina de tecido é proporcional à área dessa lâmina, mas inversa à sua espessura. A membrana alvéolo-capilar é muito fina (Figura 1.1) e tem uma área entre 50 e 100 m². Portanto, é bem capacitada para a sua função de troca gasosa.

Como é possível se obter uma superfície tão prodigiosa para a difusão dentro de uma cavidade torácica limitada? Isso é feito por um enorme número de pequenos sacos aéreos, chamados *alvéolos*, que são envolvidos por pequenos vasos sanguíneos (capilares) (Figura 1.2). Há em torno de 500 milhões de alvéolos no pulmão humano, cada um com cerca de 1/3 de mm de diâmetro. Se eles fossem esféricos,** sua área superficial total deveria ser de aproximadamente 85 m², mas seu volume seria somente de 4 litros. Do contrário, uma única esfera com esse volume deveria ter uma área superficial interna de apenas 1/100 m². Portanto, o pulmão cria sua grande área de difusão se dividindo em uma miríade de unidades.

O ar atinge um lado da membrana alvéolo-capilar através das *vias aéreas* e o outro pelos *vasos sanguíneos*.

* A pressão parcial de um gás é obtida multiplicando-se sua concentração pela pressão total. Por exemplo, o ar seco tem 20,93% de O₂. Sua pressão parcial (P_{O₂}) ao nível do mar (pressão barométrica de 760 mmHg) é $20,93/100 \times 760 = 159$ mmHg. Quando o ar é inalado pelas vias aéreas superiores, é aquecido e umedecido, e a pressão de vapor de água é de 47 mmHg, de tal forma que a pressão total do gás seco é somente $760 - 47 = 713$ mmHg. Portanto, a P_{O₂} inspirada é $20,93/100 \times 713 = 149$ mmHg. Um líquido exposto a um gás quando ocorre o equilíbrio tem a mesma pressão parcial do gás. Para uma descrição mais completa das leis dos gases, ver o Apêndice A.

** Os alvéolos não são esféricos, e sim poliédricos. Nem toda sua superfície é disponível para difusão (ver Figura 1.1). Portanto, esses números são meras aproximações.

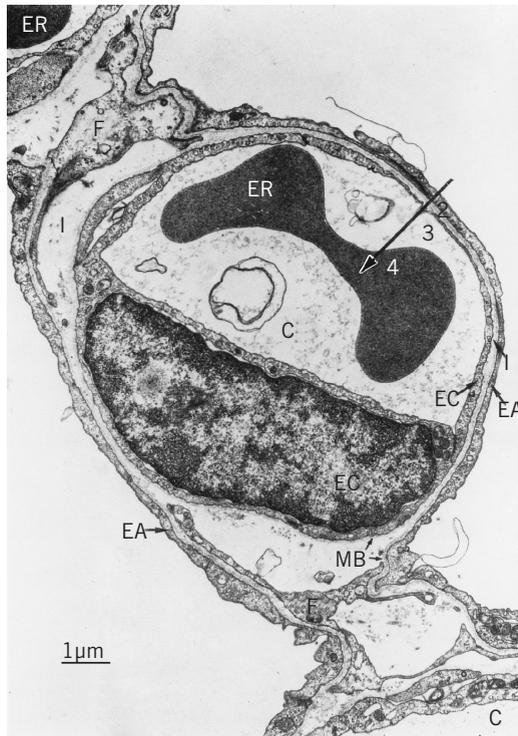


FIGURA 1.1

Microscopia eletrônica mostrando um capilar pulmonar (C) na parede alveolar. Observe a espessura extremamente fina da membrana alvéolo-capilar, com cerca de $0,3 \mu\text{m}$ em algumas porções. A seta maior indica o caminho de difusão do gás alveolar para o interior do eritrócito (ER) e inclui a camada de surfactante (não mostrada nesta preparação), o epitélio alveolar (EA), o interstício (I), o endotélio capilar (EC) e o plasma. Partes das células estruturais conhecidas como fibroblastos (F), a membrana basal (MB) e um núcleo de uma célula endotelial também são vistos.

► VIAS AÉREAS E FLUXO AÉREO

As vias aéreas consistem em uma série de tubos ramificados que, quanto mais se aprofundam no parênquima pulmonar, mais se tornam estreitos, curtos e numerosos (Figura 1.3). A *traqueia* se divide em brônquio principal direito e brônquio principal esquerdo, os quais, por sua vez, se dividem em brônquios lobares e, após, em brônquios segmentares. Esse processo continua até os *bronquíolos terminais*, que são as menores vias aéreas sem alvéolos. Todos esses brônquios formam os *ductos condutores*. Sua função é levar o gás inspirado para as regiões

pulmonares de troca gasosa (Figura 1.4). Como as vias aéreas condutoras não contêm alvéolos e, portanto, não participam da troca gasosa, elas constituem o *espaço morto anatômico*. Seu volume é de cerca de 150 mL.

Os bronquíolos terminais se dividem em *bronquíolos respiratórios*, os quais ocasionalmente possuem alvéolos nas suas paredes. Por fim, chegamos nos *ductos alveolares*, os quais são completamente recobertos por alvéolos. Essa região alveolar, onde ocorre a troca gasosa, é conhecida como *zona respiratória*. A região pulmonar distal aos bronquíolos terminais forma uma unidade anatômica chamada *ácino*. A distância dos bronquíolos terminais aos alvéolos mais distais

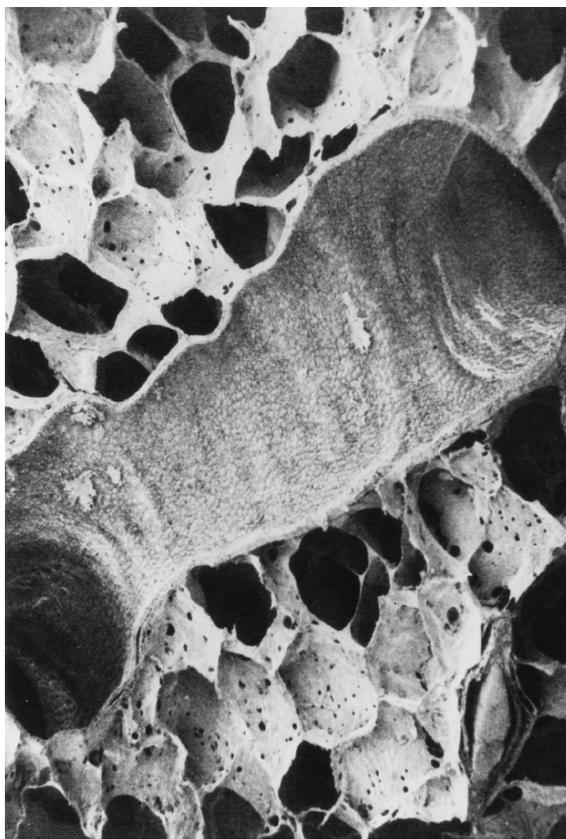


FIGURA 1.2

Corte histológico do pulmão mostrando muitos alvéolos e um bronquíolo pequeno. Os capilares pulmonares localizam-se ao longo das paredes dos alvéolos (Figura 1.1). Os orifícios nas paredes alveolares são os poros de Kohn.

é de poucos milímetros, mas a zona respiratória está presente na maior parte do pulmão, com um volume entre 2,5 e 3 litros em repouso.

Durante a inspiração, o volume da cavidade torácica aumenta e o ar é puxado para dentro do pulmão. O aumento no volume se dá em parte pela contração diafragmática, com movimento descendente do pulmão, e em parte pela ação dos músculos intercostais, os quais elevam as costelas, aumentando a área de secção transversal da caixa torácica. O gás inspirado flui até próximo dos bronquíolos terminais por fluxo intenso, como água em uma mangueira. Além desse ponto, a área das vias aéreas é tão grande, em função do vasto número de ramos (Figura 1.5), que a velocidade do ar diminui de maneira considerável. A difusão do ar nas vias aéreas é o mecanismo predominante de ventilação na zona respiratória. A taxa de difusão das moléculas gasosas nas vias aéreas é tão rápida e as distâncias a serem percorridas são tão curtas que diferenças em concentração dentro do ácino são praticamente abolidas em menos de um segundo. Entretanto,

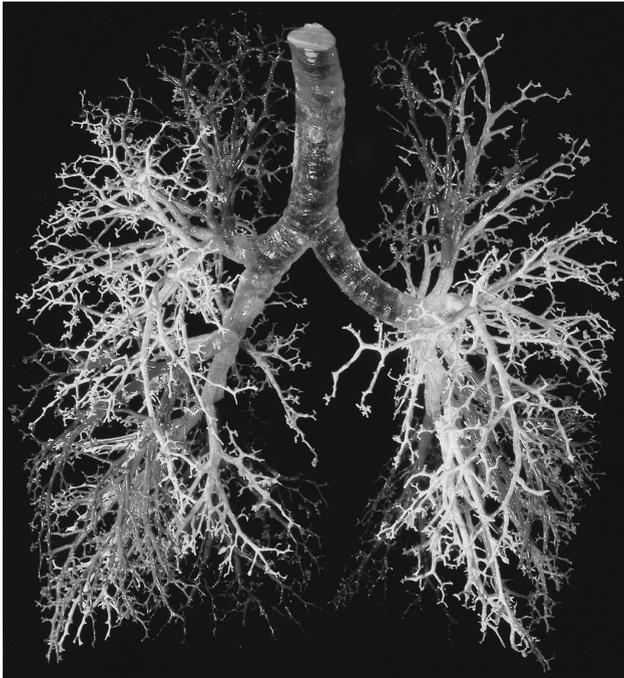


FIGURA 1.3

Molde das vias aéreas dos pulmões humanos. Os alvéolos foram retirados para permitir que as vias aéreas condutoras sejam vistas desde a traqueia até os bronquíolos terminais.

como a velocidade do ar reduz muito rapidamente na região dos bronquíolos terminais, a poeira inalada se aloja frequentemente fora desse local.

O pulmão é elástico e retorna passivamente ao seu volume pré-inspiratório quando em repouso. É facilmente distensível. Uma inspiração normal de cerca de 500 mL, por exemplo, necessita de uma pressão de distensão inferior a 3 cm de água. Em comparação, um balão infantil pode necessitar de uma pressão de 30 cm de água para o mesmo volume.

A pressão necessária para movimentar o ar através das vias aéreas também é muito pequena. Durante inspiração normal, um fluxo de 1L/s necessita de uma redução da pressão ao longo das vias aéreas menor do que 2 cm de água. Compare com um fumante de cachimbo, o qual necessita de uma pressão de aproximadamente 500 cm de água para o mesmo fluxo.

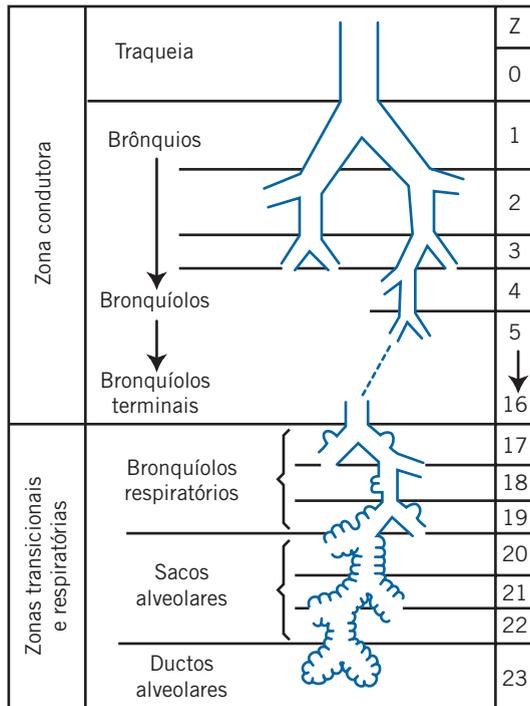


FIGURA 1.4

Idealização das vias aéreas humanas de acordo com Weibel. Observe que as primeiras 16 gerações (Z) formam as vias aéreas condutoras, e as últimas sete, a zona respiratória (ou zonas transicionais e respiratórias).

VIAS AÉREAS

- ▶ Dividem-se em zona condutora e zona respiratória.
- ▶ O volume de espaço morto anatômico é de cerca de 150 mL.
- ▶ O volume da região alveolar é de cerca de 2,5 a 3 litros.
- ▶ O movimento de ar na região alveolar ocorre principalmente por difusão.

▶ VASOS E FLUXO SANGUÍNEOS

Os vasos sanguíneos pulmonares também formam uma série de tubos ramificados da *artéria pulmonar* até os capilares, e de volta pelas *veias pulmonares*. Inicialmente, as artérias, as veias e os brônquios correm em paralelo, mas, na pe-

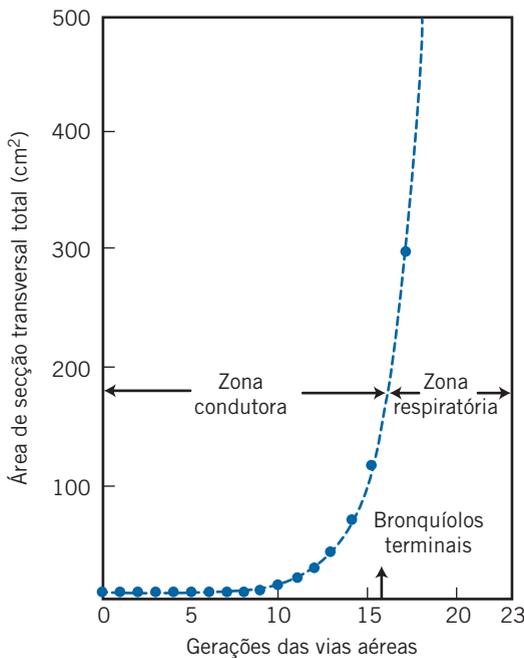


FIGURA 1.5

Diagrama para mostrar o aumento extremamente rápido da área de seção transversal total nas vias aéreas da zona respiratória (comparar com a Figura 1.4). Em função disso, a velocidade do ar durante a inspiração se torna muito pequena na região dos bronquíolos respiratórios, e a difusão de gases é o modo principal de ventilação.

riferia, as veias se distanciam para passar entre os lóbulos, enquanto as artérias e os brônquios seguem juntos o mesmo trajeto até o centro dos lóbulos. Os capilares formam uma rede densa nas paredes alveolares (Figura 1.6). O diâmetro de um segmento capilar é de cerca de 7 a 10 μm , sendo o tamanho suficiente para um eritrócito. A extensão dos segmentos é tão curta que a rede densa forma uma lâmina quase contínua de sangue na parede alveolar, uma anatomia muito eficiente para a troca gasosa. Em geral, as paredes alveolares não são vistas frente a frente, como na Figura 1.6. O corte transversal fino obtido em um microscópio convencional (Figura 1.7) mostra os eritrócitos nos capilares e enfatiza a enorme exposição do sangue ao gás alveolar, apenas com a fina membrana alvéolo-capilar (comparar com a Figura 1.1).

A espessura muito fina da membrana alvéolo-capilar faz com que os capilares sejam facilmente lesados. Aumentando muito a pressão nos capilares ou inflando o pulmão a volumes elevados, pode se elevar o estresse dos capilares ao ponto no qual podem ocorrer alterações ultraestruturais. Então, o plasma e mesmo os eritrócitos podem passar dos capilares para os espaços alveolares.

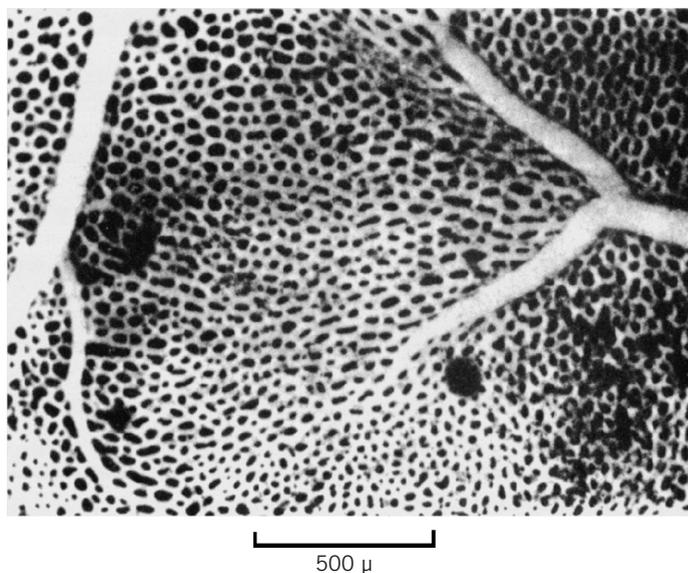


FIGURA 1.6

Visão de uma parede alveolar (de um sapo) mostrando a densa rede de capilares. Também podem ser vistas uma artéria (*à esquerda*) e uma veia (*à direita*) pequenas. Os segmentos capilares individuais são tão curtos que o sangue forma uma lâmina quase contínua.



FIGURA 1.7

Corte microscópico do pulmão de um cão, mostrando os capilares nas paredes alveolares. A membrana alvéolo-capilar é tão fina que não pode ser identificada aqui (comparar com a Figura 1.1). Este corte foi preparado a partir de um pulmão que foi rapidamente resfriado enquanto era perfundido.

A artéria pulmonar recebe todo o débito cardíaco das câmaras direitas, porém a resistência da vasculatura pulmonar é espantosamente pequena. Uma pressão de artéria pulmonar média de apenas 20 cm de água (cerca de 15 mmHg) é necessária para um fluxo de 6 L/min (o mesmo fluxo através de um canudo de refrigerante necessita de 120 cm de água).

Cada eritrócito gasta cerca de 0,75 segundo na rede capilar e, provavelmente, nesse período, atravessa dois ou três alvéolos. A anatomia é tão eficiente para a troca gasosa que esse tempo curto é praticamente suficiente para se atingir o completo equilíbrio do oxigênio e do dióxido de carbono entre o gás alveolar e o sangue capilar.

O pulmão tem um sistema sanguíneo adicional, a circulação brônquica, que supre as vias aéreas condutoras até próximo dos bronquíolos terminais.* Parte desse sangue é drenado do pulmão através das veias pulmonares, e outra parte entra na circulação sistêmica. O fluxo através da circulação brônquica é uma mera fração do que flui através da circulação pulmonar. O pulmão pode

* N. de R.T.: Embora pareça simples, a definição é fruto de grande confusão, pois as artérias brônquicas têm origem em ramos da artéria aorta e, portanto, fazem parte da circulação sistêmica – de origem no ventrículo esquerdo – e não da pulmonar – de origem no ventrículo direito. Dessa forma, a pressão sanguínea nas artérias brônquicas tem nível sistêmico.

funcionar muito bem sem essa circulação, como ocorre, por exemplo, após transplante pulmonar.

INTERFACE ALVÉOLO-CAPILAR

- ▶ Extremamente fina (0,2 a 0,3 μm) na maior parte da sua área.
- ▶ Enorme superfície de 50 a 100 m^2 .
- ▶ Possui uma extensa área, pelo fato de conter cerca de 500 milhões de alvéolos.
- ▶ É tão fina que aumentos significativos da pressão capilar podem lesar a membrana.

Para concluir essa breve abordagem da anatomia pulmonar funcional, daremos atenção a dois problemas especiais que o pulmão tem de superar.

▶ ESTABILIDADE ALVEOLAR

O pulmão pode ser considerado um conjunto de 500 milhões de bolhas, cada uma com 0,3 mm de diâmetro. Essa estrutura é naturalmente instável. Por motivo da tensão superficial de líquido recobrindo os alvéolos, há forças relativamente grandes que tendem a colapsá-los. Felizmente, algumas dessas células que recobrem os alvéolos secretam um material chamado *surfactante*, o qual reduz drasticamente a tensão da camada superficial dos alvéolos (ver Capítulo 7). Como consequência, a estabilidade alveolar é extremamente aumentada, ainda que o colapso dos pequenos espaços aéreos seja sempre um problema potencial, ocorrendo com frequência em situações patológicas.

VASOS SANGUÍNEOS

- ▶ Todo o débito cardíaco proveniente das câmaras direitas entra no pulmão.
- ▶ O diâmetro dos capilares é de cerca de 7 a 10 μm .
- ▶ A espessura de boa parte das paredes capilares é inferior a 0,3 μm .
- ▶ O sangue despende cerca de 0,75 segundo durante sua passagem nos capilares.

▶ REMOÇÃO DE PARTÍCULAS INALADAS

Com a sua superfície de 50 a 100 m^2 , o pulmão possui a maior superfície do corpo frente a um ambiente crescentemente hostil. Vários mecanismos para li-

dar com as partículas inaladas se desenvolveram (ver Capítulo 9). As partículas maiores são filtradas no nariz. As partículas menores depositadas nas vias aéreas condutoras são removidas pelo muco, o qual constantemente leva debris até a epiglote, onde é deglutido. O muco, secretado pelas glândulas mucosas e também pelas células caliciformes das paredes brônquicas, é movimentado por milhões de cílios minúsculos, os quais normalmente se movem de forma rítmica, mas podem ser paralisados por algumas toxinas inaladas.

Os alvéolos não têm cílios, e as partículas que se depositam aqui são engolfadas por grandes células móveis chamadas macrófagos. Então, o material estranho é removido do pulmão por meio dos linfáticos ou do fluxo sanguíneo. As células sanguíneas, como os leucócitos, também participam na reação de defesa ao material estranho.

FIQUE ATENTO

1. A membrana alvéolo-capilar é extremamente fina, porém com uma área muito extensa, tornando-a ideal para troca gasosa por difusão passiva.
2. As vias aéreas condutoras se estendem até os bronquíolos terminais, com um volume total de aproximadamente 150 mL. Toda a troca gasosa ocorre na zona respiratória, que possui um volume entre 2,5 e 3 litros.
3. O fluxo convectivo* do gás inspirado ocorre até próximo dos bronquíolos terminais; além desse ponto, o movimento de gás na região alveolar é predominantemente difusivo.
4. Os capilares pulmonares ocupam uma área imensa da parede alveolar, e um eritrócito gasta cerca de 0,75 segundo no interior desses vasos.

TESTE SEU CONHECIMENTO

1. Em relação à membrana alvéolo-capilar do pulmão humano:
 - a) A parte mais fina tem uma espessura de 3 μm .
 - b) A área total é de aproximadamente 1 m^2 .
 - c) Cerca de 10% da parede alveolar é ocupada por capilares.

* N. de R.T.: “Convecção” é o movimento de partículas dentro de um fluido (gás, líquido), mas não em meio sólido. É a forma mais comum de transferência de calor e massa, e ocorre por difusão – relacionada com o movimento browniano das partículas individuais – e por advecção – relacionada com o transporte em larga escala através do respectivo fluido.

- d) Se a pressão nos capilares se eleva a níveis não fisiológicos, a membrana pode ser danificada.
- e) O oxigênio atravessa a membrana por transporte ativo.
2. Quando o oxigênio se move do gás alveolar, através do lado fino da membrana alvéolo-capilar, para a hemoglobina, atravessa as seguintes camadas, nesta ordem:
- a) Epitélio, surfactante, interstício, endotélio, plasma e membrana eritrocitária.
- b) Surfactante, epitélio, interstício, endotélio, plasma e membrana eritrocitária.
- c) Surfactante, endotélio, interstício, epitélio, plasma e membrana eritrocitária.
- d) Epitélio, interstício, endotélio, plasma e membrana eritrocitária.
- e) Surfactante, epitélio, interstício, endotélio e membrana eritrocitária.
3. Qual é a P_{O_2} (em mmHg) do gás inspirado úmido de um alpinista no pico do Monte Everest (assumindo-se uma pressão barométrica de 247 mmHg)?
- a) 32
- b) 42
- c) 52
- d) 62
- e) 72
4. Em relação às vias aéreas humanas:
- a) O volume da zona condutora é de aproximadamente 50 mL.
- b) O volume pulmonar em repouso é de aproximadamente 5 L.
- c) Um bronquíolo respiratório pode ser diferenciado de um bronquíolo terminal porque o último tem alvéolos nas suas paredes.
- d) Em média, há cerca de três ramificações das vias aéreas condutoras, antes do primeiro alvéolo aparecer nas suas paredes.
- e) Nos ductos alveolares, o fluxo de gás predominante é o difusivo, e não o convectivo.
5. Em relação aos vasos sanguíneos pulmonares:
- a) As veias pulmonares formam um padrão de ramificação similar ao das vias aéreas.
- b) O diâmetro médio dos capilares é de aproximadamente 50 μm .
- c) A circulação brônquica tem aproximadamente o mesmo fluxo sanguíneo da circulação pulmonar.
- d) Em média, no repouso, o sangue despende cerca de 0,75 segundo durante sua passagem nos capilares.
- e) A pressão média na artéria pulmonar é de aproximadamente 100 mmHg.