

Fisiologia Respiratória

4

A função da respiração é essencial à manutenção da vida e pode ser definida, de um modo simplificado, como uma troca de gases entre as células do organismo e a atmosfera. A respiração é um processo bastante simples nas formas de vida unicelulares, como as bactérias, por exemplo. Nos seres humanos, depende da função de um sistema complexo, o sistema respiratório. Embora viva imerso em gases, o organismo humano precisa de mecanismos especiais do sistema respiratório, para isolar o oxigênio do ar e difundí-lo no sangue e, ao mesmo tempo, remover o dióxido de carbono do sangue para eliminação na atmosfera.

O sistema respiratório pode ser representado, simplificado, por uma membrana com enorme superfície em que, de um lado existe o ar atmosférico e do outro lado o sangue venoso. Através da membrana, ocorrem as trocas gasosas.

Quando o ar passa pelo nariz, ocorrem três funções distintas nas cavidades nasais: a. o ar é aquecido pelas superfícies dos cornetos e do septo, que tem a área de cerca de 160 cm²; b. o ar é umedecido quase por completo, mesmo antes de passar além do nariz; c. o ar é filtrado. Essas funções, em conjunto, denominam-se condicionamento

do ar das vias respiratórias superiores.

Os pulmões estão localizados na caixa torácica à direita e à esquerda do mediastino, ocupado pelo coração, grandes vasos, traquéia, timo esôfago e troncos nervosos. Os pulmões não são perfeitamente iguais. O pulmão direito é maior e é dividido por duas incisuras em três partes chamadas lobos, o lobo superior, o lobo médio e o lobo inferior. O pulmão esquerdo apresenta apenas uma incisura, formando dois lobos, um superior e outro inferior. Na face interna de cada pulmão existe o hilo pulmonar, através do qual penetram os brônquios e as artérias pulmonares e emergem as veias pulmonares.

O ar chega aos pulmões através das fossas nasais ou da boca e sucessivamente, atravessa o faringe, a laringe, a traquéia e os brônquios, que se ramificam, penetrando nos pulmões.

Externamente, cada pulmão é revestido por uma membrana transparente, a pleura, formada por dois folhetos separados por um espaço virtualmente nulo.

Os *brônquios* se ramificam à partir do hilo e cada ramo penetra num lobo. No interior do lobo os brônquios voltam a se ramificar, estabelecendo ligações com os diversos segmentos que compõem cada lobo.

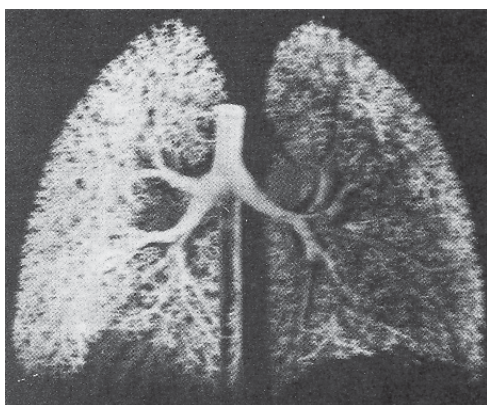


Fig. 4.1. Molde do pulmão humano injetado com plástico. O pulmão direito, mais claro, mostra a arborização brônquica, até os bronquíolos. O pulmão esquerdo mostra a arborização semelhante da artéria pulmonar e das veias pulmonares. Dessa forma, o pulmão direito ilustra a aeração e o pulmão esquerdo, a circulação.

Dentro deles, os ramos brônquicos, já chamados de *bronquíolos*, continuam a se ramificar até formarem os diminutos bronquíolos respiratórios, dos quais provém os condutos alveolares (Fig. 4.1). Estes se abrem em dilatações chamadas sáculos alveolares formados pelos alvéolos pulmonares, local onde se processa a oxigenação e a eliminação do dióxido de carbono do sangue. Chamamos de ácinos à estrutura em forma de cachos de uvas que, na verdade, são conjuntos de condutos, sáculos e alvéolos. Essas estruturas são sustentadas por uma fina trama de fibras musculares e envoltas por vasos capilares.

A função respiratória se processa mediante três atividades distintas, mas coordenadas: a *ventilação*, através da qual o ar da atmosfera chega aos alvéolos; a *perfução*, processo pelo qual o sangue venoso procedente do coração chega aos capilares dos alvéolos, e a *difusão*, processo em que o oxigênio do ar contido nos alvéolos passa

para o sangue ao mesmo tempo em que o gás carbônico contido no sangue passa para os alvéolos.

A troca de moléculas gasosas se processa através da parede alveolar, do líquido intersticial contido nos espaços entre alvéolos e capilares, da parede do capilar, do plasma sanguíneo e da membrana dos glóbulos vermelhos.

Os alvéolos são pequenas bolsas agrupadas em torno dos bronquíolos respiratórios, cuja forma e distribuição lembram uma colméia (Fig. 4.2). Graças à esta disposição, uma enorme superfície pode ocupar um volume comparativamente pequeno, à semelhança da distribuição da rede capilar. Assim, um alvéolo, que é a unidade funcional da respiração, constitui-se de uma bolsa de tecido pulmonar, contendo ar e envolvida por capilares.

Separando o ar do sangue existe, portanto, uma “parede”, constituída pela membrana do alvéolo e pela membrana do capilar. Esta parede é chamada *membrana alvéolo-capilar*, e as trocas gasosas se fazem através dela pelo processo de difusão.

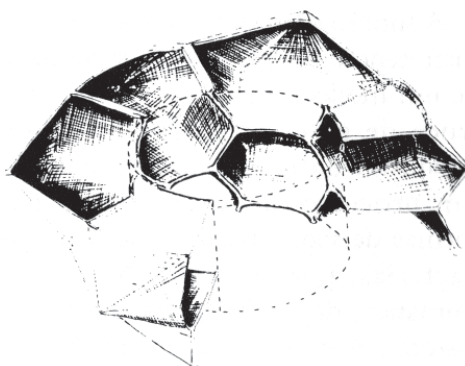


Fig. 4.2. Esquema que demonstra a disposição dos alvéolos em torno dos bronquíolos respiratórios. A forma e a disposição simulam uma colméia.

Através a membrana alvéolo-capilar, o sangue recebe o oxigênio, cede o gás carbônico e prossegue pela outra extremidade do capilar em direção às vênulas e veias pulmonares onde, já oxigenado, vai ao átrio esquerdo e ventrículo esquerdo, para ser bombeado por todo o organismo.

O sangue que chega aos capilares pulmonares pelos ramos da artéria pulmonar destina-se, exclusivamente, às trocas gasosas. A nutrição do tecido pulmonar, à semelhança dos demais órgãos, é feita por um sistema arterial independente, originado das artérias brônquicas. A circulação brônquica supre o parênquima pulmonar com oxigênio para a sua nutrição. Cerca de 1/3 do sangue da circulação venosa brônquica retorna ao átrio direito pelas veias ázigos, hemiázigos e ramos intercostais. Os 2/3 restantes drenam na circulação pulmonar e retornam ao átrio esquerdo. Esta pequena mistura venosa é chamada de shunt verdadeiro.

A camada de sangue que se distribui pelos capilares pulmonares é extraordinariamente fina, da espessura de apenas uma hemácia. A troca gasosa é, portanto, muito rápida, durando em média 0,5 segundo. O ar inspirado, que contém apenas 21% de oxigênio, cede esse gás às hemácias, quase instantaneamente.

A enorme superfície disponível para as trocas gasosas permite que em um minuto o organismo possa captar cerca de 250 ml. de oxigênio e eliminar 200 ml. de gás carbônico.

Por esta grande capacidade de eliminar gás carbônico do sangue, o pulmão humano é o mais importante regulador do equi-

líbrio ácido-básico. A respiração pode manter o pH dentro dos limites normais, alterando a quantidade de gás carbônico eliminado.

Os pulmões tem capacidade suficiente para oxigenar até 30 litros de sangue venoso por minuto, se necessário, para suprir as necessidades do organismo. Como, em condições normais, apenas 4 a 5 litros por minuto atravessam o coração, verificamos a grande reserva do pulmão humano para as condições de exercício físico.

Nenhum sistema de oxigenação artificial até hoje construído tem idêntica capacidade de oxigenação ou reserva. Entretanto, como as necessidades de oxigênio durante a cirurgia equivalem às do indivíduo em repouso absoluto, os oxigenadores são capazes de supri-las integralmente.

VENTILAÇÃO PULMONAR

A ventilação é o processo de conduzir o ar da atmosfera até os alvéolos pulmonares. Nas fossas nasais e no nasofaringe existem estruturas vasculares que aquecem e umidificam o ar inspirado. As vias aéreas superiores, acima dos bronquíolos respiratórios tem suporte cartilaginoso. São revestidas de epitélio colunar com um grande número de células produtoras de muco, que auxiliam na umidificação do ar e no transporte de partículas inaladas, para expulsão pelos movimentos ciliares e pela tosse. À partir dos bronquíolos, até as unidades respiratórias terminais não há suporte de cartilagem. As bifurcações ocorrem a curtos intervalos, até que os segmentos de bronquíolos atravessam a parede alveolar, para cada alvéolo individualmente.

A expansão e a retração dos pulmões promove a entrada e a saída de ar do seu interior, à semelhança de um fole. Dois mecanismos são responsáveis pela movimentação dos pulmões:

1. Os movimentos do diafragma, para cima e para baixo, que fazem variar o volume da caixa torácica. Para a inspiração o diafragma traciona a superfície inferior dos pulmões para baixo; para a expiração, o diafragma simplesmente se relaxa e a retração elástica dos pulmões, da caixa torácica e as estruturas abdominais comprimem os pulmões.
2. A elevação e o abaixamento das costelas aumenta ou diminui o diâmetro antero-posterior da caixa torácica, afastando o esterno da coluna e tornando as costelas mais horizontais, alavancadas pelos músculos intercostais.

A movimentação da caixa torácica produz variações na pressão das vias respiratórias. Na inspiração, a pressão intra-alveolar torna-se ligeiramente negativa em relação à pressão atmosférica, alcançando cerca de -1 mmHg. Isso faz o ar penetrar através das vias respiratórias. Na expiração normal, a pressão intra-alveolar se eleva aproximadamente $+1$ mmHg, fazendo o ar sair através das vias respiratórias. Durante a respiração forçada as pressões podem alcançar o valor de 100 mmHg, durante uma expiração máxima com a glote fechada. Pode ainda alcançar -80 mmHg, durante uma inspiração forçada.

A tendência natural dos pulmões é de colapsar e se afastar da parede torácica. Esta tendência se deve a dois fatores. O primeiro são as fibras elásticas abundantes no tecido

pulmonar, que se estiram com a insuflação pulmonar e retomam seu comprimento original, logo em seguida. O segundo é a tensão superficial do líquido que reveste internamente os alvéolos, que faz com que os mesmos mantenham a tendência ao colapso. Esse efeito decorre da atração entre as moléculas do líquido que, continuamente, tendem a diminuir a superfície de cada alvéolo. As fibras elásticas contribuem com um terço da tendência de retração pulmonar, enquanto a tensão superficial contribui com os dois terços restantes.

O espaço pleural mantém permanentemente uma pressão negativa no seu interior, que impede o colapso dos pulmões. Esta pressão negativa oscila em torno de -4 mmHg. Na inspiração profunda a pressão negativa intrapleural pode atingir a -18 mmHg, que promove a expansão pulmonar máxima.

A tendência à retração determinada pela fina camada líquida que reveste a superfície dos alvéolos é contrabalançada por uma mistura de lipoproteínas chamada *surfactante*, secretada por células especiais, existentes no epitélio de revestimento dos alvéolos. Os componentes mais importantes do surfactante são os fosfolípidios, como o dipalmitol-lecitina, o dipalmitol fosfatidilcolina, as proteínas e os íons cálcio. O surfactante tem a propriedade de diminuir a tensão superficial do líquido que reveste os alvéolos, favorecendo a sua expansão. Na ausência de surfactante a expansão pulmonar torna-se difícil e exige pressões pleurais muito negativas, da ordem de -25 mmHg, para superar a tendência ao colapso dos alvéolos. O surfac-

tante forma uma camada monomolecular sobre o líquido que reveste os alvéolos e evita a existência de uma interface água-ar, que possui uma tensão superficial duas a 14 vezes maior do que a interface surfactante-ar.

Alguns recém-natos, principalmente os prematuros, não secretam quantidades adequadas de surfactante, o que torna muito difícil a expansão pulmonar. Sem tratamento imediato e cuidadoso, a maioria destes bebês morre logo após o nascimento, devido à ventilação pulmonar inadequada. Essa condição denomina-se membrana hialina ou síndrome de angústia respiratória do recém-nato.

No pulmão normal, quando há quantidades adequadas de surfactante, a tensão superficial é grande o bastante para afastar o líquido da parede com uma pressão média de -3 mmHg. Na ausência de surfactante, essa força pode elevar-se até -10 ou -20 mmHg, suficiente para causar filtração maciça de líquido dos capilares para dentro dos alvéolos. Isto constitui edema pulmonar, em conseqüências da falta de surfactante. Na síndrome de angústia respiratória do recém-nascido, um grande número de alvéolos está cheio de líquido, constituindo um fator de agravamento do quadro respiratório.

COMPLACÊNCIA PULMONAR

Para expandir os pulmões é necessário um mínimo de esforço, que ocorre naturalmente, na atividade da respiração. A maior ou menor capacidade de expansão pulmonar é conhecida como complacência. Quando a capacidade de expandir está

diminuída, diz-se que o pulmão tem a complacência reduzida, ou, em outras palavras, um pulmão com a complacência reduzida se expande com mais dificuldade.

As condições que destroem o tecido pulmonar, produzem fibrose ou edema, ou que impeçam a expansão e retração pulmonar, tendem a diminuir a complacência. As alterações produzidas pela cirurgia na caixa torácica contribuem para reduzir a complacência do tórax. A circulação extracorpórea, por diversos mecanismos, também contribui para reduzir a complacência pulmonar, no pós-operatório imediato.

VOLUMES E CAPACIDADES PULMONARES

A ventilação pulmonar pode ser medida pela determinação dos volumes de ar existentes nos pulmões, em diferentes circunstâncias. O estudo das alterações nos volumes pulmonares é feito pela *espirometria*.

Para avaliar a ventilação consideramos os seguintes volumes pulmonares: *volume corrente*, *volume de reserva inspiratório*, *volume de reserva expiratório* e o *volume residual*.

Volume corrente (VC) é o volume de ar inspirado ou expirado em cada respiração normal. Corresponde a aproximadamente 500 ml em um adulto médio, do sexo masculino.

Volume de reserva inspiratório (VRI) é o volume extra de ar que pode ser inspirado, além do volume corrente normal, durante a inspiração máxima forçada. Corresponde a cerca de 3.000 ml. Isto significa que durante um período de respiração tranquila, se produzimos uma inspiração

máxima, chamada “suspiro”, podemos inspirar um volume adicional de 3 litros de ar.

Volume de reserva expiratório (VRE) é a quantidade de ar que ainda pode ser expirada, por uma expiração forçada, após o final da expiração corrente normal. Este volume é de cerca de 1.100 ml.

Volume residual (VR) é o volume de ar que permanece nos pulmões após uma expiração forçada. Este volume é em média de 1.200 ml.

As combinações de dois ou mais volumes são chamadas de capacidades pulmonares. As principais capacidades pulmonares são: *capacidade inspiratória*, *capacidade residual funcional*, *capacidade vital* e a *capacidade pulmonar total*.

Capacidade inspiratória é a quantidade de ar que pode ser inspirado, quando a inspiração começa ao nível expiratório normal e distende os pulmões ao máximo. Equivale a cerca de 3.500 ml e corresponde à soma do *volume corrente* e do *volume de reserva inspiratória*.

Capacidade residual funcional é a quantidade de ar que permanece nos pulmões ao final de uma expiração normal. Equivale a cerca de 2.300 ml e corresponde à soma do *volume de reserva expiratório* com o *volume residual*.

Capacidade vital é a quantidade máxima de ar que um indivíduo pode expelir dos pulmões após uma inspiração máxima, seguida de uma expiração máxima. Equivale a cerca de 4.600 ml e corresponde à soma do *volume de reserva inspiratório* com o *volume de reserva expiratório*.

Capacidade pulmonar total é o volume máximo com o qual os pulmões podem se

expandir com o maior esforço inspiratório possível. Corresponde a cerca de 5.800 ml.

Os volumes e as capacidades pulmonares são cerca de 20 a 25% menores no sexo feminino e são maiores nos indivíduos de maior porte físico e nos atletas.

A ventilação pulmonar é realizada quase totalmente pelos músculos da inspiração. Ao relaxar os músculos inspiratórios, as propriedades elásticas dos pulmões e do tórax fazem com que os pulmões se retraiam passivamente. Quando os músculos inspiratórios se acham totalmente relaxados, os pulmões retornam a um estado de relaxamento denominado nível expiratório de repouso. O volume de ar nos pulmões, neste nível, é igual à capacidade residual funcional, cerca de 2.300 ml. no adulto jovem.

O volume residual representa o ar que não pode ser removido dos pulmões, mesmo através de uma expiração forçada. É importante porque mantém ar dentro dos alvéolos, que por sua vez fazem a aeração do sangue nos intervalos das respirações. Não fosse o ar residual, a concentração de dióxido de carbono no sangue aumentaria e cairia muito em cada respiração e certamente seria desvantajoso para o processo respiratório.

O volume-minuto respiratório é a quantidade total de ar novo que entra nas vias respiratórias a cada minuto e equivale ao produto do volume corrente pela frequência respiratória. O volume corrente normal é de cerca de 500 ml. e a frequência respiratória normal é de 12 respirações por minuto. Portanto, o volume-minuto respiratório é, em média, de 6 litro por minuto, e pode ser aumentado, pelo aumento da

freqüência respiratória ou do volume corrente, conforme as necessidades do indivíduo.

A ventilação alveolar é o fator mais importante no processo ventilatório pulmonar. Representa a velocidade com que o ar alveolar é renovado a cada minuto pelo ar atmosférico, na área de trocas gasosas dos pulmões – os alvéolos, os sacos alveolares, os dutos alveolares e os bronquíolos respiratórios. A ventilação alveolar por minuto não é igual ao volume respiratório por minuto, porque uma grande porção do ar inspirado vai encher as vias aéreas, cujas membranas não são capazes de trocas gasosas significativas com o sangue.

Durante a inspiração, apenas uma pequena parte do ar inspirado realmente flui além dos bronquíolos terminais para os alvéolos. No momento em que o ar inspirado chega nas pequenas passagens aéreas, a área total transversal das vias aéreas é tão grande e a velocidade do fluxo tão pequena, que a velocidade de difusão do ar se torna maior que a do fluxo. Além disso, o ar novo inspirado e o ar contido nos alvéolos, tornam-se completamente misturados numa fração de segundo.

O ar que preenche as vias respiratórias a cada respiração é denominado ar do espaço morto. Na inspiração, grande parte de ar novo deve inicialmente preencher as diferentes regiões do espaço morto: vias nasais, faringe, traquéia e brônquios, antes de atingir os alvéolos. Na expiração, todo ar do espaço morto é expirado primeiro, antes que qualquer ar dos alvéolos atinja a atmosfera. O volume de ar que entra nos alvéolos incluindo os dutos

alveolares e bronquíolos respiratórios a cada respiração, é igual ao volume corrente menos o volume do espaço morto. O espaço morto em um adulto jovem é de cerca de 150 ml. Esse valor aumenta um pouco com a idade.

Com um volume corrente de 500 ml e o espaço morto de 150 ml e uma freqüência respiratória de 12 por minuto, a ventilação alveolar é igual a $12 \times (500 - 150) = 4.200$ ml por minuto. A ventilação alveolar é um dos principais fatores que determinam a concentração de oxigênio e dióxido de carbono nos alvéolos. A freqüência respiratória, o volume corrente e o volume minuto respiratório são importantes na medida em que afetam a ventilação alveolar.

A ventilação dos oxigenadores é fixa, não há espaço morto, uma vez que o gás circula sempre no mesmo sentido. A manutenção dos níveis fisiológicos do dióxido de carbono é mais difícil, na ventilação dos oxigenadores, pela ausência de mecanismos de proteção e de regulação.

PERFUSÃO PULMONAR

O fluxo sanguíneo que atravessa os pulmões, no coração normal, corresponde ao débito cardíaco e, portanto, os fatores que controlam o débito ventricular esquerdo, controlam igualmente o débito do ventrículo direito. A pós-carga do ventrículo direito é determinada pelas condições da vasculatura pulmonar. Quando ocorrem vasoconstrição pulmonar, a resistência pulmonar aumenta e, em consequência, o débito ventricular direito pode sofrer redução. Ao contrário, a vasodilatação pul-

monar funciona como um redutor da pós-carga e, sob certas condições, pode favorecer o aumento do fluxo sanguíneo pulmonar.

A perfusão dos alvéolos, para as trocas gasosas ao nível da membrana alveólo-capilar, é feita pelo ventrículo direito, através os ramos principais da artéria pulmonar, que se dividem continuamente, acompanhando as bifurcações do sistema brônquico, até chegar ao novelo de capilares que envolve os alvéolos. Esse verdadeiro novelo capilar constitui um envoltório que permite recobrir a superfície de trocas gasosas dos alvéolos com uma ampla camada de sangue, capaz de favorecer acentuadamente o intercâmbio dos gases. O retorno do sangue oxigenado e depurado do dióxido de carbono, se faz pelos terminais venosos dos capilares e venulas, que vão formar as veias pulmonares, direitas e esquerdas, que desembocam no átrio esquerdo.

DIFUSÃO PULMONAR

A difusão dos gases consiste na livre movimentação das suas moléculas entre dois pontos. As moléculas dos gases estão em permanente movimento, em alta velocidade, e colidem ininterruptamente, umas com as outras, mudando de direção, até colidir com novas moléculas. Esse processo gera a energia utilizada para a difusão. A difusão de gases ocorre da mesma forma, no interior de uma massa gasosa, nos gases dissolvidos em líquidos como água ou sangue, ou através de membranas permeáveis aos gases.

Se em um quarto completamente fechado, introduzirmos através da porta, um

determinado volume de um gás, ao final de algum tempo, a concentração do gás será a mesma em todos os pontos do quarto. Isto se explica pela difusão do gás, no ambiente em que foi colocado.

A difusão, portanto, é um processo que tende a igualar a diferença de concentração de uma substância, pela migração de moléculas da área de maior concentração para a área de menor concentração.

A pressão exercida por um gás sobre uma superfície, é o resultado do impacto constante das moléculas do gás em permanente movimento, contra a referida superfície. Quanto maior o número de moléculas do gás, ou seja, quanto maior a sua concentração, tanto maior será a pressão exercida pelo gás.

Nas misturas gasosas, como o ar atmosférico, a pressão exercida pela mistura equivale à soma das pressões exercidas por cada gás que compõe a mistura. Como a pressão de cada gás depende da movimentação das suas moléculas, a pressão exercida pelo gás tem relação direta com a sua concentração na mistura.

A pressão dos gases é habitualmente expressa em milímetros de mercúrio (mmHg). O padrão de comparação da pressão dos gases é a pressão barométrica ou pressão atmosférica.

A pressão atmosférica ao nível do mar, corresponde a 760 mmHg, equivalente à 1 atmosfera. Esse valor constitui a soma das pressões exercidas pelos gases que compõem o ar: nitrogênio, oxigênio, dióxido de carbono e vapor d'água.

A pressão exercida por cada gás em uma mistura é chamada pressão parcial, ou

simplesmente tensão e é representada pela letra P (maiúscula), seguida da designação química do gás. Portanto, as pressões parciais dos gases do ar atmosférico são designadas pelos termos P_{O_2} , P_{CO_2} , P_{N_2} , P_{H_2O} , referindo-se respectivamente às pressões parciais do oxigênio, do dióxido de carbono, do nitrogênio e do vapor d'água.

A tabela 4.1 representa a concentração e a pressão parcial dos gases no ar atmosférico.

Gases do ar atmosférico	Concentração	Pressão parcial (P)
Nitrogênio (N ₂)	78,62%	597 mmHg
Oxigênio (O ₂)	20,84%	159 mmHg
Dióxido de Carbono (CO ₂)	0,04%	0,3 mmHg
Vapor d'água (H ₂ O)	0,50%	3,7 mmHg
Total (Ar)	100%	760 mmHg

Tabela 4.1. Pressão parcial e concentração dos gases no ar atmosférico.

Do mesmo modo que ocorre em relação ao ar atmosférico a convenção internacionalmente estabelecida para a representação das pressões parciais dos gases consiste na letra P (maiúscula) seguida da designação do gás. Entre ambas é inserida a informação do fluido que contém o gás. Desse modo, PaO_2 representa a pressão parcial do oxigênio no sangue arterial; $PvCO_2$ representa a pressão parcial do dióxido de carbono no sangue venoso. E assim, sucessivamente.

Quando um gás sob pressão é colocado em contacto com a água, as suas moléculas penetram na água e se dissolvem, até atingir o estado de equilíbrio, em que a pressão do gás dissolvido na água é exatamente igual à sua pressão na fase gasosa.

A concentração de um gás em uma solução depende do seu coeficiente de solu-

bilidade. Alguns tipos de moléculas são física ou quimicamente atraídas pela água, enquanto outros tipos são repelidos. Quando as moléculas são atraídas pela água, uma maior quantidade pode se dissolver nela. Os gases que se dissolvem em maior quantidade na água, tem, portanto, um maior coeficiente de solubilidade. O dióxido de carbono tem um elevado coeficiente de solubilidade, quando comparado ao oxigênio e outros gases.

Quando uma mistura de gases entra em contato com a água, como ocorre no organismo humano, esta tem propensão a evaporar para dentro da mistura gasosa e umidificá-la. Isto resulta do fato de que as moléculas de água, como as dos gases dissolvidos, estão continuamente escapando da superfície aquosa para a fase gasosa. A pressão que as moléculas de água exercem para escapar através da superfície aquosa é chamada pressão do vapor d'água, que à temperatura de 37° C é de 47 mmHg. A pressão do vapor d'água, da mesma forma que a pressão parcial de qualquer gás, tende a aumentar com a temperatura. Aos 100° C, temperatura de ebulição da água, a pressão do vapor d'água é de 760 mmHg.

Embora a diferença de pressão ou de concentração e o coeficiente de solubilidade sejam importantes na difusão dos gases, outros fatores influem na velocidade da difusão, como o peso molecular do gás, a distância a percorrer para equalizar a concentração e a área da superfície disponível para a difusão. Quanto maior o peso molecular do gás, menor a velocidade com que a sua difusão se processa; quanto maior a distância a ser percorrida pelas molé-

culas do gás, mais lentamente se processará o equilíbrio de sua concentração e, quanto maior a superfície disponível para a difusão de um gás, maior será a velocidade da difusão. Este princípio é de muita utilidade no cálculo da área ideal das membranas nos oxigenadores, em relação ao fluxo de sangue, para resultar em uma efetiva troca de gases.

As características gerais da difusão dos gases permitem quantificar a rapidez com que um determinado gás pode se difundir, denominada *coeficiente de difusão*. O oxigênio pelas suas características de difusão nos organismos vivos tem o coeficiente de difusão 1. A difusão dos demais gases é quantificada em relação ao oxigênio. A tabela 4.2 lista os coeficientes de difusão para diversos gases.

Os gases respiratórios tem grande solubilidade em gorduras e, por essa razão, podem difundir com facilidade através das membranas celulares, ricas em lipídeos. A velocidade de difusão de um determinado gás no interior das células e tecidos, inclusive a membrana respiratória, depende basicamente da sua velocidade de difusão na água, já que a passagem pela membrana celular praticamente não oferece obstáculo. A difusão dos gases respiratórios através a membrana alveolo-capilar e através dos demais tecidos do organismo, se pro-

Gases	Coefficiente de Difusão
Oxigênio (O ₂)	1
Dióxido de Carbono (CO ₂)	20,3
Monóxido de Carbono (CO)	0,81
Nitrogênio (N ₂)	0,53
Hélio (H ₂)	0,95

Tabela 4.2. Coeficientes Relativos de Difusão dos Gases.

cessa de acordo com o coeficiente relativo de difusão. Aqueles dados nos indicam que o CO₂ se difunde cerca de 20 vezes mais rapidamente do que o oxigênio.

O AR ALVEOLAR

A concentração dos diferentes gases no ar dos alvéolos não é exatamente a mesma do ar atmosférico. O ar alveolar não é completamente renovado a cada respiração; parte do oxigênio do ar alveolar é continuamente transferido ao sangue e o dióxido de carbono do sangue é continuamente transferido ao ar alveolar. Além disso, o ar atmosférico seco que penetra nas vias respiratórias é umidificado nas vias aéreas superiores. Isto faz com que o ar alveolar tenha menor teor de oxigênio e maior teor de dióxido de carbono e de vapor d'água. A tabela 4.3 mostra a comparação entre a composição do ar atmosférico e o ar alveolar.

O oxigênio é continuamente absorvido no sangue dos alvéolos pulmonares en-

Gases	Ar Atmosférico		Ar Alveolar	
	Pressão parcial	Concentração	Pressão parcial	Concentração
N ₂	597,0mmHg	78,62%	569,0mmHg	74,9%
O ₂	159,0mmHg	20,84%	104,0mmHg	13,6%
CO ₂	0,3mmHg	0,04%	40,0mmHg	5,3%
H ₂ O	3,7mmHg	0,50%	47,0mmHg	6,2%
Total	760,0mmHg	100%	760,0mmHg	100%

Tabela 4.3. Comparação da composição do ar alveolar com o ar atmosférico.

quanto novo oxigênio atmosférico entra nos alvéolos. Quanto maior a rapidez com que o oxigênio é absorvido, tanto menor se torna a sua concentração nos alvéolos; por outro lado, quanto mais rapidamente o oxigênio da atmosfera é levado aos alvéolos, maior se torna a sua concentração. Por isso, a concentração do oxigênio nos alvéolos, bem como sua pressão parcial, é controlada, primeiro, pela velocidade de absorção do oxigênio para o sangue e, segundo, pela velocidade de entrada de novo oxigênio para os pulmões pelo processo ventilatório.

O dióxido de carbono é continuamente formado no organismo e, então, descarregado nos alvéolos, sendo removido destes pela ventilação pulmonar. Portanto, os dois fatores que determinam a concentração alveolar do dióxido de carbono e, também, sua pressão parcial no sangue (PaCO_2) são a velocidade de eliminação do dióxido de carbono para os alvéolos e a velocidade com que o dióxido de carbono é removido dos alvéolos pela ventilação alveolar. O teor de CO_2 do ar alveolar aumenta em proporção direta com a eliminação de dióxido de carbono do sangue e, o teor de CO_2 do ar alveolar diminui na proporção inversa da ventilação alveolar.

DIFUSÃO DOS GASES ATRAVÉS DA MEMBRANA RESPIRATÓRIA

A unidade respiratória dos pulmões é constituída por um bronquíolo respiratório, o alvéolo e o capilar. As paredes alveolares são extremamente finas e nelas existe uma extensa rede de capilares intercomunicantes. Isto faz com que o ar alveolar e o sangue este-

jam muito próximos um do outro, favorecendo as trocas gasosas (Fig. 4.3).

A troca de gases entre o sangue e o ar alveolar ocorre através da membrana alvéolo-capilar das porções terminais dos pulmões. Estas membranas, no seu conjunto são denominadas de membrana respiratória.

A membrana respiratória, embora extraordinariamente fina e permeável aos gases, tem uma estrutura constituída por várias camadas, conforme demonstrado na figura 4.4. A membrana respiratória tem na sua constituição, o *endotélio capilar*, uma camada unicelular de células endoteliais e a sua membrana *basal* que a separa da *membrana basal do epitélio alveolar* pelo espaço intersticial, a *camada epitelial* de revestimento do alvéolo que é revestida por uma outra *camada líquida que contém o surfactante*.

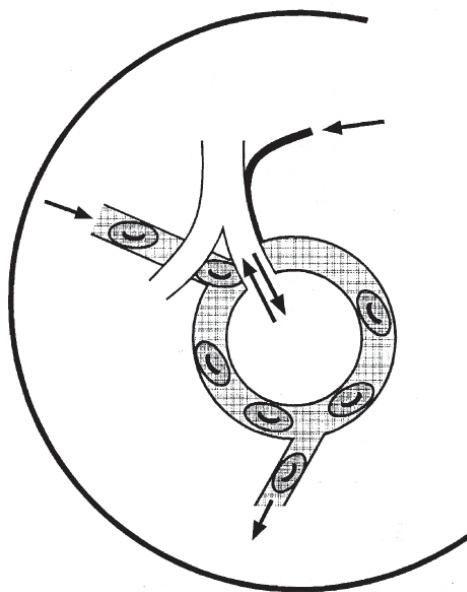


Fig. 4.3. Esquema do alvéolo. Representa o bronquíolo respiratório, o capilar ramo da artéria pulmonar (sangue venoso) e o capilar ramo da veia pulmonar (sangue oxigenado).

A espessura da membrana respiratória é de apenas 0,5 m, em média. A área total estimada da membrana respiratória de um adulto é de pelo menos 70 m². Apesar dessa enorme área disponível, o volume total de sangue nos capilares em qualquer instante é de apenas 60 a 140 ml. Esse pequeno volume de sangue é distribuído em tão ampla superfície, em uma camada extremamente fina, de vez que o diâmetro médio dos capilares pulmonares é de apenas 8 m. As hemácias são espremidas para atravessar os capilares, o que coloca a sua superfície em contato direto com a parede dos capilares, portanto, com a membrana respiratória, o que favorece as trocas gasosas. A membrana das hemácias costuma tocar a parede capilar, de formas que o oxigênio e o dióxido de carbono não necessitam passar por quantidades significativas de plasma durante a difusão.

A facilidade com que os gases atravessam a membrana respiratória, ou seja, a velocidade de difusão dos gases, depende de diversos fatores, tais como a espessura da membrana, a área de superfície da membrana, o coeficiente de difusão do gás na substância da membrana e a diferença de pressão entre os dois lados da membrana. A velocidade de difusão é inversamente proporcional à espessura da membrana. Assim, quando se acumula líquido de edema no espaço intersticial da membrana e nos alvéolos, os gases devem difundir-se não apenas através da membrana mas também através desse líquido, o que torna a difusão mais lenta. A circulação extracorpórea pode causar alterações pulmonares que levem ao aumento da água inters-

ticial e alveolar, causando dificuldades respiratórias no pós perfusão imediato ou no pós-operatório.

Pelas suas características especiais, a velocidade de difusão dos gases na membrana respiratória é praticamente igual à velocidade de difusão na água. O dióxido de carbono se difunde 20 vezes mais rápido do que o oxigênio, que, por seu turno, se difunde duas vezes mais rápido que o nitrogênio.

A diferença de pressão através da membrana respiratória é a diferença entre a pressão parcial do gás no alvéolo e a sua pressão parcial no sangue. Esta diferença de pressão representa a tendência efetiva para o gás se mover através da membrana. Quando a pressão parcial do gás nos alvéolos é maior do que no sangue, como no

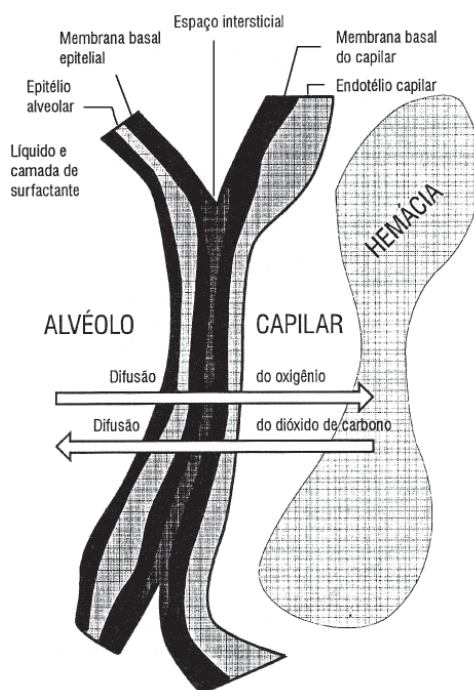


Fig. 4.4. Esquema da membrana respiratória, demonstrando as diversas camadas que a constituem, conforme a descrição do texto.

caso do oxigênio, ocorre difusão resultante dos alvéolos para o sangue. Quando a pressão parcial do gás no sangue é maior do que no ar dos alvéolos, como é o caso do dióxido de carbono, ocorre difusão do gás do sangue para os alvéolos.

A capacidade global da membrana respiratória para permutar um gás entre os alvéolos e o sangue pulmonar pode ser expressa em termos de sua capacidade de difusão, definida como o volume de gás que se difunde através da membrana a cada minuto, para uma diferença de pressão de 1 mmHg.

Num adulto jovem a capacidade de difusão para o oxigênio, em condições de repouso é de 21 ml por minuto e por mmHg. A diferença média de pressão do oxigênio através da membrana respiratória é de aproximadamente 11 mmHg, durante a respiração normal. O produto da multiplicação da diferença de pressão pela capacidade de difusão (11×21) é de cerca de 231 ml. Isto significa que a cada minuto a membrana respiratória difunde cerca de 230 ml de oxigênio para o sangue, que equivale ao volume de oxigênio consumido pelo organismo. O exercício pode aumentar a capacidade de difusão em até 3 vezes.

A capacidade de difusão do dióxido de carbono é de difícil determinação, devido à dificuldades técnicas e à grande velocidade de difusão do gás, mesmo com gradientes de pressão de apenas 1 mmHg. Estima-se, contudo, que a capacidade de difusão do dióxido de carbono seja de 400 a 450 ml por minuto, em condições de repouso, podendo atingir a 1200 ou 1300 ml durante o exercício. Essa elevada capaci-

dade de difusão do dióxido de carbono, é importante quando a membrana respiratória se torna lesada. A sua capacidade em transferir oxigênio ao sangue é prejudicada ao ponto de causar a morte do indivíduo, antes que ocorra grave redução da difusão do dióxido de carbono.

Quando determinadas doenças pulmonares, potencialmente reversíveis, ameaçam a vida pela redução da capacidade de difusão do oxigênio, costuma-se indicar a assistência respiratória prolongada, que sustenta a oxigenação do paciente pela circulação extracorpórea, até que o tratamento da doença pulmonar possa recuperar, ao menos parcialmente, a capacidade de difusão da membrana respiratória e o paciente volte a respirar com seus próprios pulmões. Essa modalidade de tratamento é conhecida como ECMO, sigla para extracorporeal membrane oxygenation, que significa oxigenação extracorpórea com membranas.

ALTERAÇÕES DA RELAÇÃO ENTRE A VENTILAÇÃO E A PERFUSÃO

É intuitivo que as trocas gasosas dependem do contínuo movimento do ar alveolar e do sangue, nos dois lados da membrana respiratória. Se o sangue perfundir os capilares alveolares não ventilados, não haverá trocas gasosas, da mesma forma que se o ar alveolar for renovado em alvéolos não adequadamente perfundidos também não haverá trocas gasosas eficientes. Quando existe ventilação normal e fluxo capilar normal, a troca de oxigênio e de dióxido de carbono através da membrana respiratória é ótima. O oxigênio é absorvi-

do do ar inspirado de tal forma que a PO_2 alveolar situa-se entre aquela do ar inspirado e a do sangue venoso. Da mesma forma, o dióxido de carbono é transferido do sangue venoso para os alvéolos, o que faz a PCO_2 alveolar elevar-se a um nível entre aquele do ar inspirado e o do sangue venoso. Assim, em condições normais, a PO_2 do ar alveolar tem em média, 104 mmHg. e a PCO_2 40 mmHg.

Qualquer desproporção entre a ventilação e a perfusão pode comprometer a eficácia das trocas gasosas nos pulmões. O mesmo fenômeno pode ser observado em oxigenadores de membranas, quando o elemento que contém as membranas para as trocas gasosas não é completamente aproveitado. Este fenômeno é considerado na construção dos oxigenadores de membranas, para evitar os efeitos da desproporção entre a ventilação e a perfusão das membranas.

TRANSPORTE DE GASES PARA OS TECIDOS

Uma vez que o oxigênio tenha se difundido dos alvéolos para o sangue pulmonar, ele é transportado, principalmente em combinação com a hemoglobina para os capilares dos tecidos, onde é liberado para uso pelas células. A presença da hemoglobina nas hemácias permite ao sangue transportar 30 a 100 vezes mais oxigênio do que seria transportado apenas sob a forma de oxigênio dissolvido na água do sangue.

Nas células teciduais, pelos processos metabólicos, o oxigênio reage com vários substratos para formar grandes quantidades de dióxido de carbono que, por sua vez,

entra nos capilares teciduais e é transportado de volta aos pulmões. O dióxido de carbono, como o oxigênio, também se combina com substâncias químicas no sangue, o que aumenta o seu transporte em 15 a 20 vezes.

A difusão do oxigênio dos alvéolos para o sangue dos capilares pulmonares, se processa porque a pressão parcial do oxigênio no ar alveolar é maior do que a pressão parcial do oxigênio no sangue venoso. Nos tecidos, o mecanismo de trocas é semelhante. A pressão parcial do oxigênio nos tecidos é baixa, em relação ao sangue dos capilares arteriais, porque o oxigênio é continuamente utilizado para o metabolismo celular. Este gradiente é responsável pela transferência de oxigênio do sangue dos capilares para os tecidos. Assim, vemos que o transporte dos gases, oxigênio e dióxido de carbono pelo sangue, depende da difusão e do movimento do sangue.

A PO_2 do sangue venoso que entra no capilar pulmonar é de apenas 40 mmHg, porque uma grande quantidade de oxigênio foi removida desse sangue quando passou através do organismo. A PO_2 no alvéolo é de 104 mmHg, fornecendo uma diferença de pressão inicial de $104 - 40 = 64$ mmHg, para a difusão do oxigênio ao capilar pulmonar. Quando o sangue venoso atinge aproximadamente $1/3$ do comprimento do capilar pulmonar a sua PO_2 já está igual à PO_2 do alvéolo. Portanto, o gradiente médio de pressão parcial de oxigênio é menor que o gradiente inicial acima registrado. Na extremidade distal do capilar pulmonar a PO_2 do sangue já é de cerca de 104 mmHg.

Normalmente o sangue arterial sistêmico é composto por 98 a 99% de sangue oxigenado que passa pelos capilares pulmonares e outros 1 a 2% de sangue pouco oxigenado que passa através da circulação brônquica, após nutrir os pulmões e ceder oxigênio aos tecidos pulmonares. Desta forma, embora o sangue que deixa os capilares pulmonares tenha uma PO_2 de 104 mmHg, ao misturar-se com o sangue do retorno da circulação brônquica para alcançar o átrio esquerdo, a PO_2 é de aproximadamente 95 mmHg. Esta queda na PO_2 representa efetivamente uma diminuição de apenas 1% na concentração de oxigênio, porque a afinidade da combinação do oxigênio com a hemoglobina não é linear à medida que se aproxima da saturação completa; a PO_2 varia consideravelmente para pequenas alterações na quantidade de oxigênio ligado à hemoglobina.

O sangue arterial que penetra nos capilares dos tecidos tem a PCO_2 de 40 mmHg, enquanto a PCO_2 do líquido intersticial é de 45 mmHg. Devido ao elevado coeficiente de difusão do dióxido de carbono, a PCO_2 do sangue no extremo venoso do capilar rapidamente alcança os 45 mmHg, que representa a PCO_2 do sangue venoso de retorno ao coração direito.

O dióxido de carbono é transportado pelo sangue para os pulmões em 3 estados diferentes: 1. sob a forma de gás dissolvi-

do, correspondendo a 7% do total transportado; 2. sob a forma de íon bicarbonato, correspondendo a 70% do total. O bicarbonato é produto da reação do dióxido de carbono com a água da hemácia, catalizada pela *anidrase carbônica*, enzima que acelera a reação cerca de 5.000 vezes. O íon hidrogênio resultante da reação é captado pela hemoglobina; 3. combinado com a hemoglobina, através de uma ligação química facilmente reversível. Esta forma de transporte corresponde à apenas 23% do to-

Transporte do CO_2 pelo sangue para os pulmões	
Forma de transporte	Percentual
CO_2 sob a forma de gás dissolvido	7%
CO_2 sob a forma de íon bicarbonato	70%
CO_2 combinado com a hemoglobina	23%
Total de CO_2	100%

Tabela 4.4. Demonstra o percentual de cada forma em que o dióxido de carbono é transportado no sangue. A maior parte do CO_2 (70%) é transportada como bicarbonato.

tal de CO_2 levado aos pulmões (Tabela 4.4).

A oxigenação e a eliminação do dióxido de carbono nos oxigenadores, se processa segundo os mesmos mecanismos físicos e químicos das trocas de gases ao nível dos alvéolos. A menor eficiência das trocas nos oxigenadores, se deve à ausência da membrana alvéolo-capilar e à grande espessura das camadas de sangue nos mecanismos dos oxigenadores, tanto de bolhas como de membranas.

REFERÊNCIAS SELECIONADAS

1. Anthony, C.P.; Thibodeau, G.A. – Textbook of Anatomy and Physiology. The Respiratory System. C.V. Mosby Co., St. Louis, 1979.
2. Best, C.H. – Respiration. Best and Taylor's Physiological Basis of Medical Practice. Williams & Wilkins, Baltimore, 1988.
3. Clements, J.A. – Pulmonary surfactant. Amer. Rev. Resp. Dis. 101, 984 - 990, 1970.
4. Fraser, R.G.; Paré, J.A.P – Diagnosis of Diseases of the Chest. 2nd. edition. W.B. Saunders Co. Philadelphia, 1977.
5. Guyton, A.C. – Respiração. Tratado de Fisiologia Médica. 6a edição. Editora Guanabara, Rio de Janeiro, 1986.
6. Laver, M.B.; Austin, G.; Wilson, R.S. Blood-gas exchange and hemodynamic performance. Sabiston & Spencer, Gibbon's Surgery of the Chest, 3rd. edition. W.B. Saunders Co. Philadelphia, 1976.
7. Lloyd, T.C., Jr. – Respiratory gas exchange and transport. in Selkurt, E.E. – Physiology. 3rd. edition. little, Brown and Co. Boston, 1971.
8. Nosé, Y. – The oxygenator. Manual on artificial organs, Vol II. C.V. Mosby Co. St. Louis, 1973.
9. Peters, R.M. Pulmonary functions and its evaluation. in Glenn, W.W.L.; Baue, A.E.; Geha, A.S.; Laks, H. Thoracic and Cardiovascular Surgery. 4th edition. Appleton - Century-Crofts, Norwalk, 1983.
10. Pitt, B.; Gillis, N.; Hammond, G. – Depression of pulmonary metabolic function by cardiopulmonary bypass procedures increases levels of circulating norepinephrine. J. Thorac. Surg. 38, 508 - 613, 1984.
11. West, J.B. – Causes of carbon dioxide retention in lung disease. N. Engl. J. Med. 284, 1232 - 1235, 1971.
12. Winter, P.M.; Smith, G. – The toxicity of oxygen. Anesthesiology, 37, 210 - 214, 1972.