

## AULA 3

### ANATOMIA E FUNÇÕES DAS VIAS RESPIRATÓRIAS.

A perfeita compreensão do funcionamento dos métodos e das técnicas de assistência respiratória extracorpórea pelo emprego de aparelhos que são genericamente considerados como "pulmões artificiais" (oxigenadores) requer um entendimento dos mecanismos envolvidos nas trocas gasosas do pulmão normal. Para uma revisão mais ampla da anatomia e das funções das vias respiratórias recomendamos a revisão de textos de fisiologia respiratória, notadamente do capítulo 4 do livro "Fundamentos da Circulação Extracorpórea" que oferecemos como leitura complementar aos módulos do presente curso. Nessa aula vamos nos limitar ao estudo dos principais fenômenos que ocorrem durante as trocas gasosas respiratórias com a finalidade de oferecer os subsídios necessários à compreensão do funcionamento dos oxigenadores de membranas.

#### **O SISTEMA RESPIRATÓRIO**

A respiração é essencial à manutenção da vida e pode ser definida como a troca de gases entre as células do organismo e a atmosfera, intermediada pelo sangue. Nos seres humanos, a respiração 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 difundi-lo no sangue e, ao mesmo tempo, remover o dióxido de carbono em excesso no sangue para eliminação na atmosfera.

O sistema respiratório pode ser representado simplificada por uma membrana com enorme superfície em que, de um lado existe o ar atmosférico e do outro lado o sangue venoso.

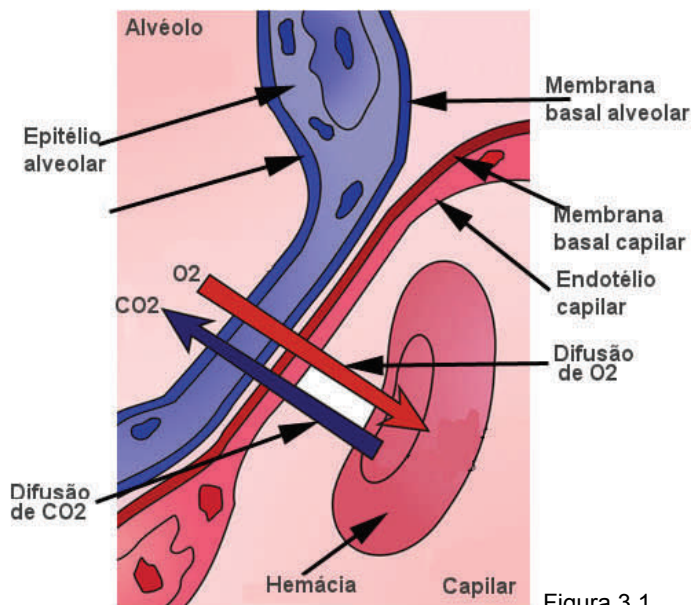


Figura 3.1

Através da membrana, ocorrem as trocas gasosas. A figura 3.1 representa esquematicamente a respiração e as trocas gasosas com o sangue que ocorrem através de uma membrana constituída pela parede alveolar o espaço intersticial e a parede do capilar sanguíneo que envolve o alvéolo.

olo.

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. Os brônquios se ramificam à partir do ponto de entrada em cada pulmão, na sua face interna denominada 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. 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. 3.2). 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 ca-

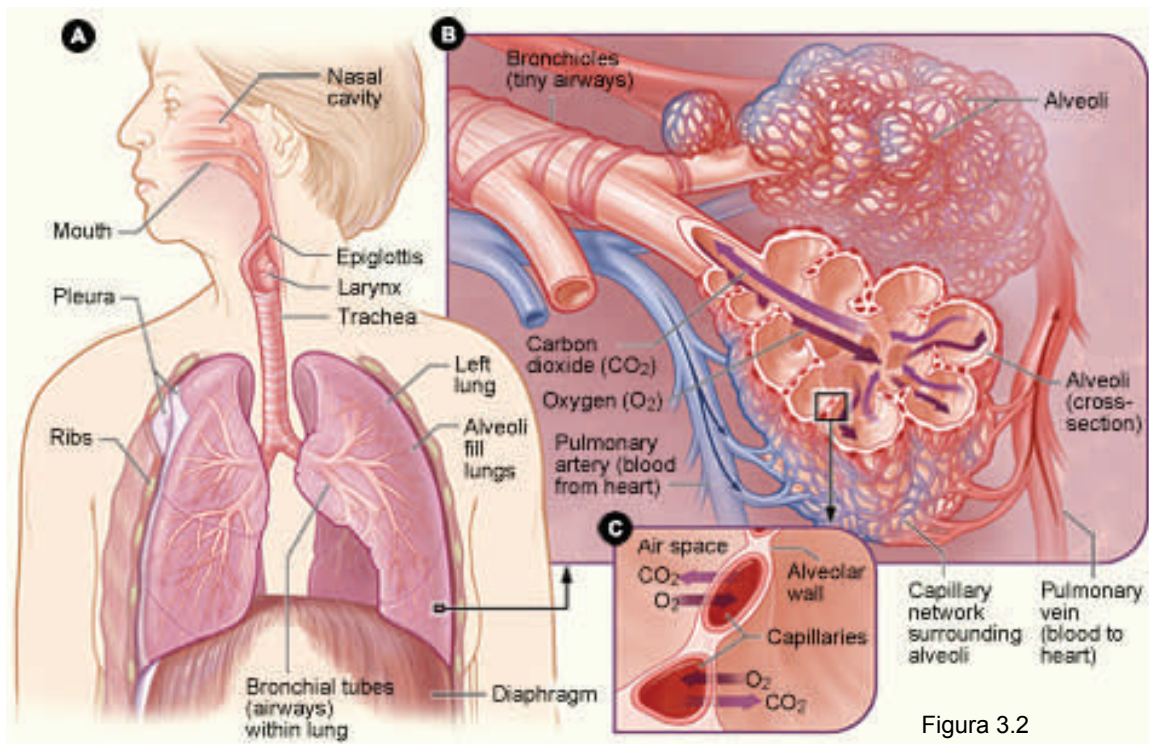


Figura 3.2

chos 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 estrutura dos alvéolos envolvidos pela trama de capilares é bem demonstrada na figura 3.3. É, por outro lado, muito importante, o conhecimento da forma pela qual ocorrem as trocas gasosas e, para isso, devemos conhecer a membrana alvéolo-capilar. De um lado dessa estrutura temos o ar que ocupa o interior do alvéolo pulmonar e, do outro lado dessa membrana, temos o sangue que circula em uma lâmina unicelular, fa-

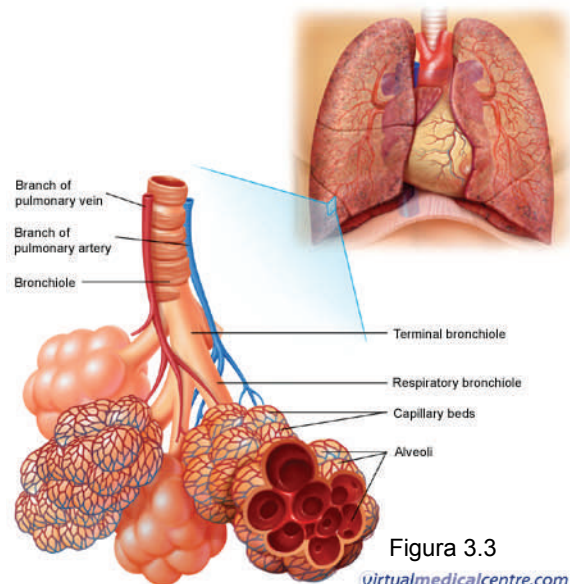


Figura 3.3

[virtualmedicalcentre.com](http://virtualmedicalcentre.com)

vorecendo ao máximo as trocas gasosas entre o ar alveolar e o sangue.

## **FUNÇÃO RESPIRATÓRIA**

A função respiratória se processa mediante três atividades distintas e coordenadas: a ventilação, através da qual o ar da atmosfera chega aos alvéolos; a perfusão, que consiste no processo pelo qual o sangue venoso procedente do coração direito (átrio e ventrículo direitos) 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 das 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. 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 espécie de parede, constituída pela membrana do alvéolo e pela membrana do capilar. Esta parede é a chamada membrana alvéolo-capilar. As trocas gasosas se fazem através dessa membrana

alvéolo-capilar pelo processo de difusão.

Através da 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, de 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. Essa 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 um organismo adulto 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 equilíbrio ácido-base. 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 (pulmão artificial ou oxigenador) até hoje construído tem idêntica capacidade de oxigenação ou reserva. Entretanto, como as necessidades de oxigênio de um indivíduo em repouso são relativamente pequenas, em comparação com o indivíduo em exercício, os oxigenadores existentes são perfeitamente capazes de supri-las integralmente.

Após a ventilação dos alvéolos ocorre a difusão de oxigênio do seu interior para o sangue pulmonar e a difusão do dióxido de carbono na direção oposta. A difusão ocorre devido ao movimento cinético das moléculas dos gases. A velocidade de difusão de cada um dos gases participantes da respiração é diretamente proporcional à pressão exercida por esse gás, chamada de pressão parcial. Cada gás contribui para a pressão total de uma mistura gasosa em proporção direta com a sua concentração. Os gases dissolvidos na água e nos tecidos do corpo também exercem pressão, porque as moléculas dissolvidas estão em movimento aleatório e têm energia cinética. Quando o ar penetra nas vias respiratórias, a água das su-

perfícies dessas vias imediatamente se evapora, mistura e, portanto, umidifica o ar. Isto é resultado do fato de que as moléculas de água, como as diferentes moléculas de gases dissolvidos, estão continuamente escapando da superfície de água para a fase gasosa. A pressão que as moléculas de água exercem para escapar através da superfície é chamada de pressão de vapor da água. A difusão efetiva de um gás de área de alta pressão para área de baixa pressão é igual ao número de moléculas que se movimentam nesta direção menos o número que se movimenta na direção oposta, e isto, por sua vez, é proporcional à diferença entre a pressão de gás das duas áreas, chamada de diferença de pressão de difusão.

Os gases envolvidos na respiração têm elevada solubilidade nos lipídeos e, desse modo, são altamente solúveis nas membranas celulares.

O ar alveolar não tem a mesma concentração de gases que o ar atmosférico, porque a cada ciclo respiratório o ar alveolar é parcialmente renovado pelo ar atmosférico, o oxigênio está constantemente sendo absorvido do ar alveolar para o sangue e o dióxido de carbono se difundindo do sangue pulmonar para os alvéolos. Ao ingressar nas vias respiratórias, o ar é totalmente umidificado antes de alcançar os alvéolos. Cada inspiração normal traz cerca de 350 ml de ar fresco para os alvéolos. O mesmo volume é eliminado a cada expiração, de modo que muitas inspirações são necessárias para substituir a maior parte do ar alveolar. Esta substituição lenta do ar alveolar é importante para impedir mudanças bruscas nas concentrações gasosas do sangue.

O oxigênio é constantemente absorvido pelo sangue que circula através dos

pulmões; ao mesmo tempo, o oxigênio do ar atmosférico é continuamente inspirado e alcança os alvéolos. Quanto mais rapidamente o oxigênio é absorvido, mais baixa será sua concentração nos alvéolos; por outro lado, quanto mais rápido o oxigênio é inspirado da atmosfera pelos alvéolos, mais alta será sua concentração. O dióxido de carbono é continuamente formado no organismo, em seguida descarregado nos alvéolos e removido pela ventilação. As concentrações e pressões de oxigênio e de dióxido de carbono nos alvéolos são determinadas pelas velocidades de absorção ou de excreção dos dois gases e também pelo nível de ventilação alveolar.

Estudos histológicos estimam que a superfície total da membrana respiratória tenha área de aproximadamente 50 a 100 metros quadrados no adulto normal. Os principais fatores que determinam a velocidade da difusão gasosa através da membrana respiratória são a espessura da membrana, a área superficial da membrana, a velocidade de difusão do gás e a diferença de pressão entre os dois lados da membrana.

Quando o sangue arterial alcança os tecidos periféricos, sua pressão parcial de oxigênio é maior do que a pressão parcial de oxigênio no líquido intersticial. Essa enorme diferença de pressão causa a difusão muito rápida do oxigênio do sangue para os tecidos. Quando o oxigênio é utilizado pelas células, a maior parte dele é transformada em dióxido de carbono e este aumenta a sua pressão parcial intracelular. Em seguida, o dióxido de carbono se difunde das células para os capilares teciduais e depois é levado pelo sangue para os pulmões, onde se difunde dos capilares pulmonares para os alvéolos.



Normalmente, 97% do oxigênio transportado dos pulmões para os tecidos é carregado em combinação química com a hemoglobina das hemácias, enquanto os 3% restantes são transportados dissolvidos na água do plasma e das células.

Assim, em condições normais, o oxigênio é transportado para os tecidos quase totalmente pela hemoglobina. Quando a pressão parcial de oxigênio está alta, como nos capilares pulmonares, o oxigênio se liga com a hemoglobina, mas quando a pressão parcial de oxigênio está baixa, como nos capilares teciduais, o oxigênio é liberado da hemoglobina. Esta é a base para quase todo o transporte de oxigênio dos pulmões para os tecidos.

## **CONSUMO CELULAR DE OXIGÊNIO**

Sob condições normais, a velocidade de utilização de oxigênio pelas células é controlada, em última análise, pela velocidade de consumo energético dentro das células, isto é, pela velocidade com que o ADP (difosfato de adenosina) é produzido a partir do ATP (trifosfato de adenosina). O monóxido de carbono se combina com a hemoglobina no mesmo ponto onde o oxigênio se associa e, por conseguinte, pode deslocar o oxigênio da hemoglobina. Além disso, ele se liga à hemoglobina com 250 vezes mais firmeza que o oxigênio. Um paciente gravemente envenenado com monóxido de carbono pode ser adequadamente tratado administrando-se oxigênio puro, pois o oxigênio em altas pressões alveolares desloca o monóxido de carbono mais rapidamente do que o oxigênio sob baixa pressão atmosférica.

O dióxido de carbono pode ser transportado sob a forma dissolvida (7%), com-

binando-se com a água no interior das hemácias para formar ácido carbônico e, em seguida os íons hidrogênio e bicarbonato, em reação catalisada pela anidrase carbônica (70%) e combinado com a hemoglobina e proteínas plasmáticas (15 a 25%). O ácido carbônico formado quando o dióxido de carbono entra no sangue dos tecidos diminui o pH sanguíneo. Contudo, a reação deste ácido com os tampões do sangue impede que a concentração de íons hidrogênio aumente muito (e que o pH desça muito). Normalmente, o sangue arterial tem um pH de aproximadamente 7,41 e, à medida que o sangue adquire dióxido de carbono nos capilares teciduais, o pH desce para um valor de aproximadamente 7,37. Ocorre o reverso quando o dióxido de carbono é liberado do sangue para os pulmões, com o pH se elevando para o valor arterial.

Nos oxigenadores de membrana, as reações químicas que ocorrem entre o oxigênio e a hemoglobina e entre o dióxido de carbono, a água e a hemoglobina são exatamente as mesmas. As diferenças entre os dois modelos de trocas gasosas correm por conta de vários fatores, tais como a pequena área de membranas disponível para as trocas (4 a 5 m<sup>2</sup> em um oxigenador para adultos). A concentração e o fluxo dos gases no lado “gasoso” (correspondente ao lado alveolar) das membranas sintéticas são controlados pelo indivíduo que opera o oxigenador e não por um sistema de “feedback” comandado pelo centro respiratório. Disso decorre a grande facilidade de superoxigenar o sangue ou de remover o dióxido de carbono em excesso, promovendo eliminação de íons hidrogênio e conseqüente elevação do pH. O resultado será hiperóxia e alcalose respiratória.

A correta manipulação dos gases sanguíneos durante a ECMO é decorrência do conhecimento das trocas gasosas através de membranas semipermeáveis, da pressão parcial exercida pelos gases e do fluxo de gás necessário para cada paci-

ente. A monitorização dos gases arteriais e venosos dos pacientes é uma das verificações mais importantes nos procedimentos em que a respiração é realizada por oxigenadores de membranas. Os gases sanguíneos podem alterar-se ou ser alterados com grande facilidade e, grandes oscilações dos gases modificam o pH substancialmente, podendo alterar de modo significativo a velocidade das reações químicas que ocorrem no espaço intracelular.