

AULA 5

CIRCULAÇÃO DO SANGUE. OXIGENAÇÃO DOS TECIDOS. ELIMINAÇÃO DE GÁS CARBÔNICO.

O sistema circulatório é um grande sistema fechado constituído por vasos que conduzem o sangue dos ventrículos aos tecidos, e destes de volta aos átrios. Está dividido em dois circuitos: 1. circulação pulmonar ou pequena circulação, que transporta o sangue do coração direito para as trocas gasosas respiratórias, e 2. circulação periférica ou sistêmica, responsável pelo transporte do sangue a todos os tecidos para o suprimento de oxigênio e demais nutrientes.

Existem dois tipos de vasos na circulação: os vasos sanguíneos e os vasos linfáticos. Os vasos sanguíneos são de três tipos principais: artérias, veias e capilares.

As artérias são os vasos encarregados de transportar o sangue bombeado pelo coração para os tecidos. As artérias periféricas nascem da aorta e se dirigem ao crânio, ao tórax e membros superiores, abdome e membros inferiores. Das artérias principais, nascem outras artérias que se dirigem às diferentes regiões ou órgãos, onde continuam a se ramificar, como os ramos de uma árvore, até distribuir ramos para todos os pontos do organismo. As artérias distais, os menores ramos da imensa rede arterial, são as arteríolas. As arteríolas se conectam à rede de capilares do organismo, que tem contato com praticamente todas as células. Na extremidade oposta os capilares vão se agrupando em vênulas, cujo conjunto vai formando as veias, que acompanham regularmente o trajeto das artérias, em sentido inverso, até se reunirem nas grandes veias cava superior e inferior, que dre-

nam todo o sangue recebido na rede capilar, de volta ao átrio direito.

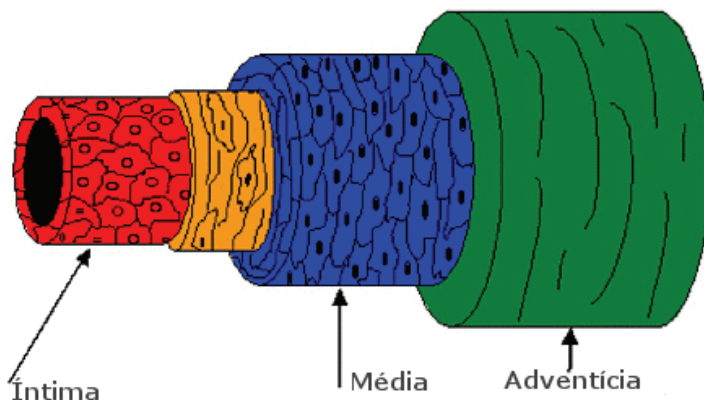


Figura 5.1. Paredes dos vasos (artérias e veias).

As paredes das artérias e das veias são formadas por três camadas (Fig. 5.1). A camada externa, constituída por tecido conjuntivo e algumas fibras elásticas, é chamada adventícia. Esta camada serve de suporte para os vasos. Quando

uma artéria é seccionada, a camada adventícia tende a mantê-la aberta. A adventícia das veias é mais fina e menos resistente e quando seccionadas, as veias tendem a colapsar suas paredes. A camada média, constituída principalmente por fibras musculares e elásticas, é muito mais espessa nas artérias do que nas veias. É responsável pela contração e relaxamento dos vasos. A sístole cardíaca força o sangue para o interior das artérias e a estrutura muscular das suas paredes permite a sua expansão, para acomodar o volume adicional impulsionado. A contração das artérias, em seguida, auxilia a impulsão do sangue pelo sistema arterial. A camada mais interna, a íntima é constituída pelo endotélio, cuja função é predominantemente anti-trombogênica. No revestimento interno das veias, o endotélio forma cúspides, a intervalos, que funcionam como válvulas que auxiliam o direcionamento do sangue para o coração direito. As camadas íntima e média dos vasos recolhem o oxigênio e outros elementos para a sua própria nutrição por difusão do sangue no seu interior. A camada adventícia possui pequenos vasos, artérias, veias e capilares, responsáveis pela nutrição do próprio vaso, chamados "vasa-vasorum", que significa vasos dos vasos.

Os capilares formam uma rede extensa e difusa que penetra na intimidade de

todos os tecidos do organismo. São constituídos por uma única camada de células, o endotélio, em continuidade com o endotélio das arteríolas e das vênulas. O endotélio dos capilares é permeável ao oxigênio, dióxido de carbono, glicose e diversos íons. Embora de tamanho diminuto, os capilares são os verdadeiros responsáveis pelas funções nutritivas do sistema cardiovascular. É através o seu endotélio que se processam todas as trocas nutritivas que mantém o meio ambiente celular em condições adequadas de funcionamento.

As artérias são os vasos de distribuição de sangue ao sistema capilar. O sistema de distribuição se caracteriza por ser de baixo volume e alta pressão. Os vasos de resistência são as arteríolas que, com os esfíncteres pré-capilares se constituem na principal resistência ao fluxo de sangue.

Os capilares tem o comprimento aproximado de 1 milímetro e um diâmetro médio de 8 a 12 milésimos de milímetro (micron). Existem aproximadamente 5 a 10 bilhões de capilares em um adulto médio, correspondendo a uma área de 500 a 700 m². Se todo o sistema capilar do organismo pudesse ser disposto em linha reta, alcançaria uma extensão de aproximadamente 136.000 Km. Estima-se que em apenas 1 cm² de tecido muscular existem cerca de 250.000 capilares. Esta ampla distribuição da rede capilar faz com que cada célula do organismo tenha um capilar a menos de 20 ou 30 microns de distância.

As vênulas e veias constituem os vasos de capacitância ou reservatório. O sistema de capacitância é tipicamente um sistema de grandes volumes e baixas pressões.

Os vasos linfáticos constituem, juntamente com os gânglios, o sistema linfático que é um sistema acessório do sistema circulatório, através do qual circula a lin-

fa, um líquido aquoso, rico em proteínas e gorduras. Mais da metade da linfa do organismo se origina no fígado e nos intestinos, constituída à partir de nutrientes absorvidos no processo da digestão. Os capilares linfáticos existem em todos os tecidos em proximidade aos capilares sanguíneos. A parede endotelial dos capilares linfáticos é altamente permeável às proteínas e outras grandes moléculas e, o sistema linfático recolhe do líquido intersticial aquelas macromoléculas que não podem alcançar a rede capilar sanguínea. O sistema de vasos linfáticos se concentra no interior do tórax e, através do canal torácico, desemboca na junção das veias jugular e subclávia esquerdas, lançando a linfa, no sangue venoso. A linfa retorna à circulação sistêmica em fluxos aproximados de 125ml por hora.

A MICROCIRCULAÇÃO

A microcirculação é o segmento do sistema circulatório que inclui os capilares e as porções terminais das arteríolas e vênulas; constitui-se em unidades funcionais bem definidas, cuja organização visa facilitar a função nutritiva e excretora do sangue. A estrutura da microcirculação está representada na figura 5.2. A arteríola terminal se continua em uma metarteríola, que tem apenas uma camada muscular descontínua, ao contrário da arteríola terminal. A metarteríola origina capilares que formam um conjunto enovelado. Na extremidade oposta os capilares se unem em uma vênula. Entre a metarteríola e a vênula existe uma comunicação artério-venosa, que permite ao sangue das arteríolas terminais alcan-

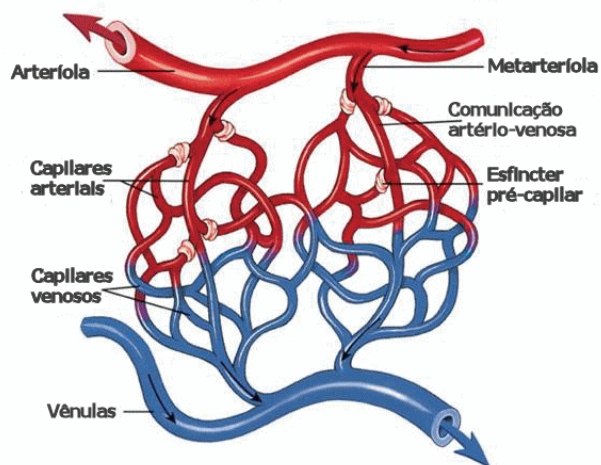


Figura 5.2. Representa a microcirculação. O esfíncter pós-capilar não está representado na ilustração, mas é exatamente igual ao esfíncter pré-capilar.

çar diretamente o sistema venular sem atravessar os capilares. No início da arteríola existe um pequeno e denso anel muscular, o esfíncter pré-capilar, cuja contração fecha a entrada de sangue nos capilares. Na porção inicial da vênula existe uma outra estrutura muscular semelhante, o esfíncter pós-capilar, cuja contração impede a saída do sangue dos capilares. Os esfíncteres desempenham importante papel na regulação do fluxo nos capilares, especialmente o esfíncter pré-capilar, que responde aos estímulos locais dos tecidos. O sangue pode seguir diferentes trajetos na microcirculação, dependendo das necessidades dos tecidos. A constrição do esfíncter pré-capilar força a passagem do sangue da arteríola para a vênula, sem atravessar os capilares. Quando as necessidades de oxigênio dos tecidos aumentam, há abertura de um grande número de esfíncteres para irrigar um maior número de conjuntos de capilares.

METABOLISMO

Mesmo quando um indivíduo se encontra em repouso completo, necessita de uma quantidade considerável de energia para a realização de todas as reações químicas do organismo para a manutenção da vida. Para citar apenas um exemplo, vejamos o consumo de energia de um adulto do sexo masculino com 70 kg de peso corporal. Durante o sono esse indivíduo consome 65 calorias por hora. Sentado em repouso o consumo de energia é de 100 calorias por hora e caminhando lentamente, o consumo de energia aumenta para 200 calorias por hora.

A energia que o organismo necessita para a manutenção da vida provém das reações metabólicas ocorridas no interior das células. Hidratos de carbono, gorduras e proteínas são consumidas nas reações metabólicas que culminam com a produção de ATP (trifosfato de adenosina) cuja função é armazenar a energia que as células precisam consumir. As moléculas de hidratos de carbono, principalmen-

te a glicose, são as mais usadas para a produção de energia.

O metabolismo utiliza os produtos da digestão dos alimentos e o oxigênio captado pela respiração para a produção da energia necessária à manutenção das reações químicas, cujo conjunto permite o funcionamento adequado do organismo e a manutenção da vida orgânica. O oxigênio é essencial a essas reações metabólicas.

Quando a oferta de oxigênio está reduzida ou quando há escassez de oxigênio captado pelos processos da respiração pulmonar, a produção de energia se reduz consideravelmente. Nessas circunstâncias o organismo precisa lançar mão do metabolismo anaeróbio, ou seja, o metabolismo que se realiza na ausência de oxigênio. O metabolismo anaeróbio, contudo, é extremamente ineficaz e os tecidos do organismo sofrem injúria a curto prazo. Na ausência de oxigênio, o cérebro, cujo consumo de oxigênio é bastante elevado, resiste apenas três minutos, sem sofrer dano. Após três minutos de hipóxia, as células cerebrais começam a sofrer injúria, inicialmente funcional e, em seguida, sofrem injúria estrutural. Persistindo a hipóxia, a injúria cerebral progride e, ao cabo de algum tempo, torna-se ampla e irreversível, constituindo o quadro de morte cerebral.

Portanto, nos pacientes em risco de desenvolver hipóxia, uma medida essencial é oferecer oxigênio suplementar para manter as trocas gasosas com o sangue em níveis normais. Isso pode ser feito através do enriquecimento do ar ambiente com um fluxo de oxigênio, como nas incubadoras, por cateter nasal ou por máscara facial. Nos casos em que essas medidas são ineficazes devido à perda da capacidade funcional de grande parte do tecido pulmonar, há necessidade de aumentar o fluxo e a pressão da inspiração de gases enriquecidos com oxigênio. Para tanto torna-se necessária a entubação traqueal e o emprego dos respiradores mecâni-

COS.

A assistência respiratória ou o controle da respiração com o emprego dos respiradores mecânicos resolve a maior parte das dificuldades com a oxigenação do sangue e a eliminação do dióxido de carbono. Quando as membranas alvéolo-capilares estão comprometidas em grande extensão, os respiradores mecânicos são ineficazes porque as trocas gasosas deixam de ser realizadas. Nesses casos há indicação para a oxigenação extracorpórea por uma das variedades da ECMO.

OXIGENAÇÃO DOS TECIDOS

Os gases são capazes de mover-se entre dois pontos pelo processo de difusão. Esse movimento é determinado pela diferença de pressão entre os dois pontos considerados. Um gás sempre se move do ponto de maior pressão (ou concentração) para o ponto de menor pressão (ou concentração). Desse modo, o oxigênio difunde-se dos alvéolos pulmonares para o sangue capilar dos pulmões devido à pressão de oxigênio (PO₂) mais elevada nos alvéolos do que no sangue venoso pulmonar.

Nos tecidos do organismo, uma PO₂ mais elevada no sangue capilar do que nos tecidos determina a difusão do oxigênio para o interior das células próximas ao capilar.

Cerca de 98% do sangue que chega ao átrio esquerdo proveniente dos pulmões passaram pelos capilares pulmonares e foram oxigenados até uma PO₂ de aproximadamente 104 mmHg. Outros 2% do sangue passaram diretamente da aorta pela circulação brônquica, que supre, principalmente, os tecidos profundos dos pulmões, sem exposição ao ar pulmonar. Esse fluxo sanguíneo representa o

fluxo do “shunt” pulmonar ou, em outras palavras, representa o sangue que atravessa os pulmões sem participar das trocas gasosas. Esse sangue se combina ao sangue que retorna dos pulmões através das veias pulmonares e, dessa mistura, resulta o sangue que vai ser bombeado pelo ventrículo esquerdo para a aorta, cuja PO₂ é de 95 mmHg.

Quando o sangue arterial chega aos capilares dos tecidos periféricos, a sua PO₂ é de 95 mmHg. No líquido intersticial que circunda as células dos tecidos, a PO₂ é, em média, de 40 mmHg. Existe, portanto, uma grande diferença de PO₂ que determina a rápida difusão do oxigênio do sangue para os tecidos. Essa difusão ocorre tão rapidamente que a PO₂ capilar cai para um valor quase igual à pressão de 40 mmHg existente no espaço intersticial.

Como o oxigênio é continuamente utilizado pelas células, a PO₂ no seu interior é sempre inferior à PO₂ do espaço intersticial. A PO₂ no interior das células é, em média, de 23 mmHg. Apesar de aparentemente baixa, essa PO₂ é mais do que suficiente para suprir todas as necessidades de oxigênio das células. Como as células não armazenam oxigênio é essencial que o fluxo de oxigênio para o metabolismo celular seja mantido continuamente. Esse fluxo de oxigênio é mantido pela perfusão dos tecidos com sangue arterial rico em oxigênio.

Nas condições da ECMO, em que o fluxo de sangue é mantido por uma bomba mecânica que emite fluxo linear, não pulsátil, a PO₂ mínima deve estar em torno de 100-120 mmHg, para assegurar o fluxo contínuo de oxigênio necessário ao metabolismo celular. Quando o fornecimento de oxigênio é inferior às necessidades celulares ocorre a situação denominada hipóxia intracelular que termina por expressar-se no sangue como acidose metabólica. Essa acidose decorre do fato de que as células privadas de oxigênio passam a ativar o metabolismo anaeróbico

como um recurso para manter a atividade celular. Os subprodutos do metabolismo anaeróbico são ácidos fixos (não voláteis) que são lançados na circulação e reduzem o pH do sangue. Os principais ácidos fixos são o ácido lático e o ácido pirúvico. Essa acidose metabólica é também conhecida como acidose lática.

A monitorização da PO₂ do sangue arterial, da PO₂ e do pH do sangue venoso mostram indiretamente a qualidade da oxigenação celular. Essa é uma medida grosseira porque representa a média do que ocorre no organismo mas não reflete eventual hipóxia em um órgão específico. Apesar dessa desvantagem, a monitorização dos gases arteriais e venosos e do pH orientam suficientemente bem o profissional que opera o ECMO em relação à adequácia do suprimento de oxigênio aos tecidos e células do organismo.

ELIMINAÇÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO DOS TECIDOS

Quando o oxigênio (O₂) é utilizado pelas células, a maior parte é transformada em dióxido de carbono (CO₂), o que aumenta a pressão parcial do CO₂ no interior das células. Em consequência da elevada PCO₂ intracelular, o dióxido de carbono se difunde para os capilares, sendo, então, transportado até os pulmões.

Nos pulmões, o CO₂ se difunde dos capilares alveolares para os alvéolos, onde a PCO₂ é mais baixa do que no sangue capilar. Por suas características particulares, o dióxido de carbono se difunde cerca de 20 vezes mais rapidamente do que o oxigênio. Portanto, pequenas diferenças de PCO₂ são suficientes para uma elevada eliminação de CO₂ do sangue capilar para o interior dos alvéolos, de onde é eliminado pela expiração.

Durante as trocas de gases nos oxigenadores de membranas, podemos variar a PCO₂ mediante variações da concentração de CO₂ na mistura gasosa instilada no gás do oxigenador (geralmente mistura de oxigênio e ar; menos frequentemente mistura de oxigênio e CO₂). Se aumentarmos o fluxo do gás que ventila o oxigenador de membranas, o CO₂ será eliminado mais rapidamente e, desse modo, podemos regular a PCO₂ do sangue dos pacientes. O ajuste dos gases sanguíneos nos oxigenadores de membranas será visto com mais detalhes no módulo intermediário.