

AULA 7

O EQUILÍBRIO ÁCIDO-BASE DURANTE A ECMO

Os pacientes portadores de insuficiência respiratória aguda, em especial quando o processo pulmonar progride até o ponto em que as medidas de tratamento intensivo mais agressivas, como o emprego de respiradores mecânicos, são ineficazes, apresentam grandes alterações dos níveis sanguíneos e tissulares dos gases respiratórios. Oxigênio em quantidades inferiores às necessidades metabólicas e dióxido de carbono (CO₂) em quantidades superiores ao que a respiração pulmonar consegue eliminar constituem um quadro capaz de levar à morte a curtos intervalos de tempo, se não forem agressivamente revertidos. Esse quadro relativo aos gases sanguíneos, hipóxia e hiper carbida, constitui o quadro mais comumente visto nos pacientes encaminhados para os tratamentos com o ECMO e sua importância justifica plenamente a revisão dos principais conceitos do equilíbrio entre os ácidos e as bases do organismo.

É oportuno lembrar que a retenção de CO₂ produz um aumento do ácido carbônico do sangue, devido à reação do CO₂ com a água, para formar ácido carbônico (H₂CO₃). Esse ácido carbônico dissolvido e dissociado em HCO₃⁻ e H⁺, contribui com grandes quantidades de íons hidrogênio livres que provocam a redução do pH. Instala-se um quadro de acidose respiratória que, com muita frequência, é severa e capaz de interferir com o metabolismo celular.

Ao mesmo tempo em que a retenção de CO₂ produz seus efeitos nocivos, a hipóxia estimula diversos grupos celulares a socorrerem-se do metabolismo anaeróbico para compensar a redução da produção de energia que ocorre em função da reduzida oferta de oxigênio. O metabolismo anaeróbico produz, como resíduos finais, os ácidos fixos, como o ácido pirúvico e, principalmente, o ácido lático. Esse ácido lático em excesso no sangue contribui para introduzir um componente adicional de acidose, a acidose metabólica. A acidose composta, respiratória e metabólica, contribui em maior escala para o desencadear de eventos que não se res-



Figura 7.1. Queima anaeróbica da glicose e produção de ácidos fixos, não voláteis.

trigem à redução da velocidade das reações metabólicas. Eles também aumentam a propensão para a produção de hemorragias, exacerbam as respostas inflamatórias que o organismo apresenta em reação ao contato do sangue com as superfícies não endoteliais dos circuitos do ECMO e estimulam o surgimento de outras complicações, todas de grande importância e

capazes de contribuir para o aumento da mortalidade e da morbidade dos procedimentos de assistência cardiopulmonar extracorpórea prolongada.

O especialista em ECMO deve conhecer os mecanismos de regulação do equilíbrio ácido-base disponíveis quando a regulação dos níveis de oxigênio e de dióxido de carbono depende do manuseio das máquinas e não dos estímulos que chegam ao centro respiratório dos pacientes. Portanto, a revisão dos conceitos bási-

cos desse equilíbrio é essencial para o completo domínio dos processos de assistência cardiopulmonar extracorpórea de curta ou longa duração.

A função normal das células do organismo depende de uma série de processos bioquímicos e enzimáticos do metabolismo celular. Diversos fatores devem ser mantidos dentro de estreitos limites, para preservar a função celular, como a temperatura, a osmolaridade, os eletrólitos e as quantidades de nutrientes, o oxigênio, o dióxido de carbono e o íon hidrogênio.

Um dos fatores mais importantes na preservação do metabolismo celular é a quantidade de hidrogênio livre existente dentro e fora das células. Pequenas variações da concentração do hidrogênio, podem produzir grandes alterações na velocidade das reações químicas das células, acelerando algumas e retardando outras. Estas alterações são capazes de modificar profundamente o metabolismo celular, a ponto de inibir inteiramente certas funções; alterações extremas podem determinar a morte celular.

A concentração do hidrogênio livre no organismo depende da ação de substâncias que disputam o hidrogênio entre si. As que cedem hidrogênio e as que captam o hidrogênio. As substâncias que tendem a ceder hidrogênio em uma solução são chamadas de ácidos. As substâncias que tendem a captar o hidrogênio nas soluções são as bases. A concentração final do hidrogênio resulta do equilíbrio entre esses dois grupos de substâncias, ácidos e bases.

O metabolismo celular produz ácidos que são liberados continuamente na corrente sanguínea. O organismo neutraliza esses ácidos para prevenir mudanças a-

gudas na concentração de hidrogênio e preservar a função celular. Quando ácidos ou bases são administrados aos pacientes, estas substâncias modificam o estado do equilíbrio entre ácidos e bases do organismo, com conseqüente alteração da quantidade de hidrogênio livre.

Durante a ECMO ou o ECLS podem ocorrer alterações importantes desse delicado equilíbrio entre ácidos e bases capazes de produzir sérios transtornos da função celular. Esses desvios pode ser prevenidos ou corrigidos através de medidas simples, desde que sejam conhecidos os princípios fisiológicos que governam a atuação dos ácidos e das bases do organismo.

FISIOLOGIA DO EQUILÍBRIO ÁCIDO-BASE

O modo pelo qual o organismo regula a concentração dos íons hidrogênio (H^+), é de fundamental importância, para a avaliação das alterações do equilíbrio entre os ácidos e as bases no interior das células (líquido intracelular), no meio líquido que as cerca (líquido intersticial) e no sangue (líquido intravascular).

CONCEITO DE ÁCIDO E BASE

Os elementos importantes para a função celular, sob o ponto de vista químico, estão em solução. Uma solução é um líquido formado pela mistura de duas ou mais substâncias, inteiramente dispersas entre si, de um modo homogêneo. Uma solução consiste de um *solvente*, o componente principal, e um ou mais *solutos*. O organismo humano contém 60 a 80% de água, conforme a idade do indivíduo

e, nas soluções biológicas, a água constitui o solvente universal. As demais substâncias em solução, constituem os solutos.

Em uma solução biológica um soluto pode estar em estado ionizado, ou seja, os elementos ou radicais químicos que a compõem estão dissociados uns dos outros; a porção da substância que existe no estado dissociado ou ionizado é chamada *íon*. Uma outra parte do soluto existe no estado não ionizado; ambas coexistem, em um tipo especial de equilíbrio químico.

Existem substâncias, como os ácidos fortes, as bases fortes e os sais, que permanecem em solução, quase completamente no estado ionizado, enquanto outras substâncias, como os ácidos e bases fracas permanecem em solução, em graus diversos de ionização. *A água tem sempre um pequeno número de moléculas, no estado ionizado.*

Um ácido é uma substância capaz de doar prótons (H^+). Uma base é uma substância capaz de receber prótons. Em outras palavras, os ácidos são substâncias que, quando em solução, tem capacidade de ceder íons hidrogênio; as bases são substâncias que, quando em solução, tem capacidade de captar íons hidrogênio.

Um ácido forte pode doar muitos íons hidrogênio para a solução e uma base forte pode captar muitos íons hidrogênio da solução. Soluções ácidas e básicas nas mesmas concentrações, neutralizam-se volume a volume, quaisquer que sejam o ácido ou a base.

DETERMINAÇÃO DA ATIVIDADE DO ÍON HIDROGÊNIO

A presença e a atividade dos íons hidrogênio em uma solução e nos sistemas biológicos, devem ser avaliadas pela determinação da quantidade de hidrogênio livre. Para a avaliação do hidrogênio livre nas soluções de ácidos ou de bases, usa-se a unidade pH. O termo pH significa potência de hidrogênio; foi criado para simplificar a quantificação da concentração de H^+ na água e nas soluções.

A substância padrão, utilizada como referência é a água. A água se dissocia em pequena quantidade em íons hidrogênio (H^+) e hidroxila (OH^-). A constante de ionização da água é muito pequena, bem como são pequenas as quantidades de H^+ e OH^- , em solução. A quantidade de hidrogênio livre na água é 0,0000001. Para facilitar a comparação destas pequenas quantidades de íons, Sorensen adotou a fração exponencial, ao invés da fração decimal. Assim, Sorensen referiu-se à concentração de 10^{-7} , como a "potência sete do hidrogênio", para definir a sua quantidade na água. Hasselbalch criou o termo pH, para expressar o logaritmo negativo da atividade do íon hidrogênio. O pH de uma solução, portanto, é o inverso da sua concentração de íons hidrogênio. A convenção de Hasselbalch permite que os valores da atividade do hidrogênio nas soluções, sejam expressos em números positivos. A escala do pH, varia de 0 a 14, representando a acidez ou a alcalinidade de uma solução, em comparação com a água.

Pelas quantidade relativas de íons hidrogênio (H^+) e hidroxila (OH^-), a água tem uma concentração total de íons de 10^{-14} , que corresponde a partes iguais, ou seja 10^{-7} , de cada um dos íons. Dessa forma, a água tem o $pH=7$ e, pelas suas características, é considerada uma substância neutra, ou seja nem ácida nem ba-

se. A água serve de padrão de comparação para todas as soluções.

As soluções cujo pH está entre 0 e 7 são ditas ácidas; as que tem o pH entre 7 e 14 são ditas básicas ou alcalinas.

Se acrescentarmos uma base forte a um ácido fraco, o ácido será neutralizado à medida em que a base é gotejada na solução, formando-se um sal. Se representarmos a escala logarítmica de pH, em relação às quantidades adicionadas de base, traçaremos uma curva de

titulação do ácido, que forma um S suave. O pH varia rapidamente, até um certo ponto e, desse ponto em diante, há necessidade da adição de maior quantidade de bases para que o pH volte a subir.

REGULAÇÃO DO pH NO ORGANISMO

Quando se adiciona ácido à água, mesmo em pequenas quantidades, o pH se altera rapidamente. O mesmo ocorre com a adição de bases. Pequenas quantidades de ácido ou de base podem produzir grandes alterações do pH da água.

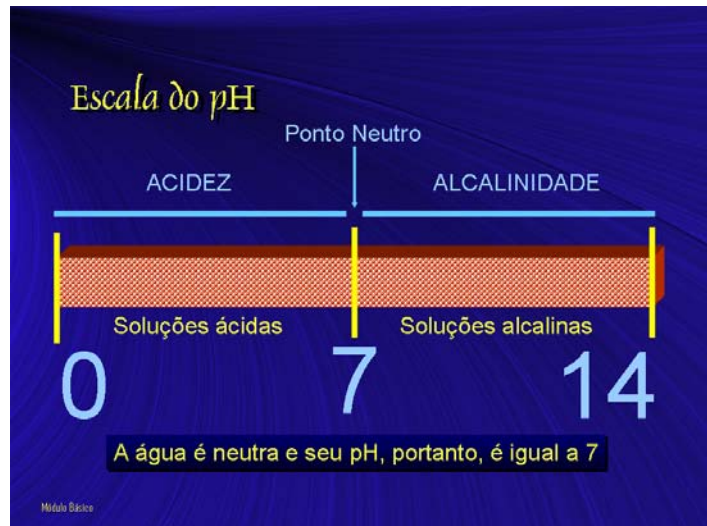


Figura 7.2. Escala do pH. Representa as faixas de acidez e de alcalinidade das soluções.

Se adicionarmos ácido ou base ao plasma sanguíneo, veremos que há necessidade de uma quantidade apreciável de um ou de outro, até que se produzam alterações do pH. O balanço entre ácidos e bases no organismo é uma busca constante do equilíbrio; o plasma resiste às variações bruscas do pH. O plasma, portanto, dispõe de mecanismos de defesa contra as alterações do pH.

Os mecanismos de defesa do organismo contra as variações bruscas do pH, são químicos e fisiológicos, e agem em íntima relação. Os mecanismos químicos são representados por conjuntos de substâncias capazes de reagir tanto com ácidos quanto com bases, neutralizando-as, e dificultando as oscilações do pH. Os mecanismos fisiológicos são representados pelos pulmões e pelos rins, que eliminam substâncias indesejáveis ou em excesso, ácidos ou bases, e poupam outras, de acordo com as necessidades do momento.

O mecanismo de defesa de natureza respiratória é o mais imediato, para corrigir alterações agudas, como as que ocorrem durante os procedimentos de assistência extracorpórea (ECMO / ECLS). O principal produto do metabolismo é o dióxido de carbono (CO_2), que é a fonte de ácido carbônico (H_2CO_3), por reação química com a água (H_2O). Os pulmões eliminam o dióxido de carbono, reduzindo o teor de ácidos no sangue e demais compartimentos líquidos do organismo.

Os mecanismos renais são mais lentos e tardios; seus efeitos não são apreciáveis nas alterações que ocorrem agudamente, como as alterações vistas nos procedimentos de assistência extracorpórea (ECMO / ECLS). A principal função dos rins no balanço ácido-base é promover a poupança ou a eliminação de bicarbonato, conforme as necessidades do organismo.

“SISTEMAS ‘TAMPÃO’”

Um par de substâncias, capaz de reagir tanto com um ácido quanto com uma base, é chamado *sistema tampão*.

Um sistema tampão é constituído por um ácido fraco e o seu sal de uma base forte, em relação constante, para combinar com ácidos e bases em excesso e evitar variações do pH.

Os tampões são substâncias que dificultam as alterações do pH pela adição de ácidos ou bases. São fundamentais ao organismo, porque o metabolismo gera muito ácido. A regulação do equilíbrio ácido-base no organismo, depende da atuação dos sistemas tampão existentes no sangue (líquido intravascular), nos tecidos (líquido intersticial) e no interior das células (líquido intracelular). Os sistemas tampão são também conhecidos, pela sua denominação inglesa: sistemas “buffer”.

A tabela abaixo lista os principais sistemas tampão do organismo e as suas quantidades relativas.

Composição do sistema	Percentual do total
Bicarbonato/Ácido carbônico	64%
Hemoglobina/Oxihemoglobina	28%
Proteínas ácidas/Proteínas básicas	7%
Fosfato monoácido/Fosfato diácido	1%

Quando um ácido se acumula em maior quantidade no organismo, é neutralizado no sangue, no líquido intersticial e no interior das células, em partes aproximadamente iguais, ou seja, 1/3 do ácido é neutralizado no sangue, 1/3 é neutralizado no líquido intersticial e 1/3 no líquido intracelular. Este último é o que mais demora a ser solicitado e ativado.

O sistema bicarbonato/ácido carbônico é o de maior importância na regulação do pH, durante os procedimentos de ECMO e ECLS. A base forte deste sistema é o bicarbonato e o ácido fraco é o ácido carbônico.

Quando um ácido se acumula no sangue, o bicarbonato do sistema tampão se combina com o mesmo, alterando o equilíbrio próprio do sistema tampão. O ácido carbônico em excesso, se dissocia em CO₂ e H₂O e o dióxido de carbono é eliminado pelos pulmões ou pelo oxigenador.

Os sistemas tampão agem em sincronismo, e todos participam da regulação do pH. O sistema tampão se altera, para restabelecer o pH; a seguir procura refazer o seu próprio equilíbrio químico.

O pH do plasma sanguíneo traduz as reações de um infindável número de substâncias dissolvidas, inclusive os sistemas tampão; seu valor normal corresponde à uma estreita faixa que varia entre 7,35 e 7,45.

REGULAÇÃO RESPIRATÓRIA DO pH

O metabolismo normal produz ácidos, que são neutralizados, eliminados do organismo ou são incorporados à outras substâncias. Em condições normais de metabolismo, são produzidos por dia, por um indivíduo, cerca de 12.000 miliequivalentes de H^+ , ou 12.000 miliequivalentes de CO_2 . Menos de 1% desse ácido é excretado pelos rins. O dióxido de carbono é transportado no sangue, sob a forma de um ácido volátil ($H_2CO_3 = H^+ + HCO_3^- = H_2O + CO_2$), o ácido carbônico, e eliminado pelos pulmões. Em solução aquosa, como no plasma, o CO_2 é hidratado, formando o H_2CO_3 (ácido carbônico), que se dissocia em H^+ e HCO_3^- . O sangue venoso transporta, dessa forma, o dióxido de carbono produzido nos tecidos até os pulmões, onde se difunde pela membrana alveolo-capilar, para o ar dos alvéolos; durante a oxigenação extracorpórea (ECMO) o sangue venoso transporta o CO_2 ao oxigenador, onde se difunde para o ar ambiente. O oxigenador desempenha o mesmo papel dos pulmões na regulação do equilíbrio ácido-base, durante a oxigenação extracorpórea. As oscilações e a transferência do CO_2 , dependem apenas da ventilação; a água é reaproveitada pelos tecidos ou eliminada pelos rins.

Quando o CO_2 não é eliminado adequadamente, como ocorre com as doenças pulmonares agudas que acometem grandes quantidades de alvéolos, esse gás se acumula no sangue e reage com a água, aumentando o teor de ácido carbônico. O ácido é parcialmente neutralizado pelo bicarbonato do sistema tampão, mas deixa livre um excesso de H^+ , que tende a reduzir o pH. Ao contrário, quando o CO_2 é eliminado em excesso no oxigenador (fluxos de gás acima do necessário), o bicarbonato ($NaHCO_3$) se dissocia. O sódio (Na^+) livre, forma sais diferentes do bicarbonato e o íon HCO_3^- reage com a água (H_2O), formando ácido carbônico e íons hidroxila (OH^-). Os íons hidroxila combinam-se aos íons hidrogênio (H^+) para

formar água. A produção de H_2CO_3 reduz o teor de H^+ no sangue, com consequente elevação do pH.

A regulação respiratória do equilíbrio ácido-base é feita exclusivamente através da regulação do CO_2 . Alterações da ventilação nos oxigenadores podem produzir quebra desse balanço e interferir com o metabolismo celular.

REGULAÇÃO RENAL DO pH

Os mecanismos de defesa contra as alterações do pH sanguíneo incluem um mecanismo de ação rápida, o respiratório, e o mecanismo renal, de ação mais lenta e eficaz apenas para compensar alterações crônicas ou de longa duração. A compensação renal do pH é eficaz após 24 a 48 horas e não ocorre significativamente, durante a oxigenação extracorpórea nos procedimentos de ECMO. Via de regra, os pulmões eliminam as substâncias voláteis (gases) e os rins eliminam as substâncias que os pulmões não tem capacidade de eliminar (substâncias não gasosas ou não voláteis). A compensação renal, entretanto, é mais completa, porque retorna o poder de tamponamento do sangue a níveis normais, refazendo o seu principal sistema tampão. Os rins excretam, diariamente, 50 miliequivalentes de íons hidrogênio e reabsorvem 5.000 miliequivalentes de íon bicarbonato.

Além de influir na restauração do equilíbrio ácido-base, a compensação renal é a mais importante na manutenção da constância do meio ambiente das células, o líquido extracelular. Os rins reagem aos distúrbios da osmolaridade, desidratação e hipotensão, eliminando ácidos não voláteis e não carbônicos.

PARÂMETROS DO EQUILÍBRIO ÁCIDO-BASE

Os valores dos parâmetros do equilíbrio ácido-base do sangue expressam a integração entre as diversas substâncias, os sistemas tampão e os mecanismos de regulação respiratória e renal.

Os parâmetros importantes para a análise do equilíbrio ácido-base são o pH, a tensão parcial de dióxido de carbono no sangue (PCO_2) e o teor de bicarbonato (HCO_3).

O pH define se há acidose ou alcalose, conforme seu valor esteja abaixo ou acima da faixa de normalidade do sangue. Quando o pH do sangue está abaixo de 7,35 dizemos que existe acidose. Quando, ao contrário, o pH do sangue está acima de 7,45 dizemos que há alcalose.

A tensão parcial de CO_2 no sangue (PCO_2) define a existência e o grau de distúrbio respiratório, relativo à eliminação do dióxido de carbono. A faixa normal para a PCO_2 é de 35 a 45mmHg. Se o pH do sangue está abaixo de 7,35 e a PCO_2 está acima de 7,45 dizemos que há acidose respiratória.

O bicarbonato "standard" ou bicarbonato padrão é o teor de bicarbonato equilibrado com uma mistura gasosa com tensão parcial de dióxido de 40mmHg ($PCO_2=40mmHg$). O bicarbonato real, é a quantidade de bicarbonato existente na amostra de sangue analisada. Pode coincidir com o bicarbonato padrão, quando será normal, ou pode refletir os distúrbios existentes.

A base tampão ou base total, corresponde à soma do teor de bases do plasma ou seja, a soma das concentrações de todas as bases contidas no sangue, compreendendo todos os sistemas tampão.

A diferença de bases, (BE ou BD) denominação para excesso de bases (BE) ou para o seu déficit (BD), reflete o excesso ou a diminuição das bases tampão, em relação ao seu valor normal. O valor normal para a diferença de bases varia entre 0 e ± 3 .

O bicarbonato real, o excesso ou déficit de bases, não são medidos diretamente na amostra do sangue; o bicarbonato é derivado à partir das dosagens do pH e do PCO₂ e o excesso de bases é determinado à partir dos valores do pH, do PCO₂ e da hemoglobina, para dimensionar os tampões existentes nos glóbulos vermelhos. O resultado daqueles valores é expresso em miliequivalentes por litro (mEq/l) de bases, acima ou abaixo, dos valores normais de bases.

O valor da tensão parcial de oxigênio (PO₂) medido na mesma amostra de sangue, informa o estado da oxigenação do sangue (amostra arterial) ou da utilização do oxigênio pelos tecidos (amostra venosa); não tem significado na apreciação dos distúrbios do equilíbrio ácido-base.

CLASSIFICAÇÃO DOS DISTÚRBIOS DO EQ. ÁCIDO BASE

As alterações do equilíbrio ácido-base correspondem, em essência, às variações da concentração de íon hidrogênio no sangue. O aumento da quantidade de íons

hidrogênio, reduz o pH e, portanto, produz acidose. A redução da quantidade de íons hidrogênio, aumenta o pH e, ao contrário, produz alcalose. As alterações pronunciadas do pH, não são bem toleradas pelo organismo. A faixa de tolerância do organismo humano se situa entre 6,8 e 7,8; valores fora daquela faixa, abaixo de 6,8 ou acima de 7,8, são extremamente difíceis de reverter. Um valor de pH inferior a 6,8, com grande frequência, indica acidose irreversível.

Conforme a origem, os distúrbios do equilíbrio ácido-base, acidose ou alcalose, podem ser de natureza metabólica ou respiratória. Em condições normais existe um delicado balanço entre os componentes metabólico e respiratório, que determina a estabilidade do pH, dentro da faixa normal, representado pela seguinte equação:

$$\text{pH} = \frac{\text{Componente Metabólico}}{\text{Componente Respiratório}}$$

Quando o organismo acumula ácidos oriundos do metabolismo, o pH do sangue se reduz; dizemos que a acidose é de origem metabólica. Quando o organismo acumula CO₂, não eliminado adequadamente pela ventilação, o pH se reduz; dizemos que a acidose é de origem respiratória.

Se o organismo acumula bases em excesso, por exemplo o bicarbonato, o pH se eleva; dizemos que a alcalose é de origem metabólica. Se o organismo elimina CO₂ em excesso por hiperventilação, o pH se eleva; dizemos que há alcalose res-

piratória.

Acidose ou alcalose respiratórias, compreendem alterações primárias da ventilação, como causa do distúrbio. Acidose ou alcalose metabólicas, compreendem alterações primárias do metabolismo, como causa do distúrbio.

Os valores normais dos parâmetros que analisam o equilíbrio ácido-base do organismo são:

pH= 7,35 a 7,45

PCO₂= 35 a 45mmHg

HCO₃= 22 a 28 mEq/l

BE= -3 a +3

A tabela abaixo lista os principais distúrbios do equilíbrio ácido base e as alterações encontradas na análise do sangue.

Distúrbio	pH	pCO ₂	BE	HCO ₃
Acidose respiratória	↓	↑	N	↑
Alcalose respiratória	↑	↓	N	↓
Acidose metabólica	↓	N	↓	↓
Alcalose metabólica	↑	N	↑	↑

Tabela 7.2. A tabela mostra as alterações dos parâmetros de avaliação dos distúrbios do equilíbrio ácido-base nas quatro variações principais (isoladas). Devemos lembrar que há a possibilidade de coexistirem dois desses distúrbios. A acidose, por exemplo pode ser causada por alterações respiratórias e metabólicas num mesmo paciente.

Algumas vezes, os mecanismos de compensação podem dificultar a interpretação dos resultados das amostras, para o diagnóstico da causa primária. Na circulação extracorpórea convencional ou na ECMO, entretanto, as alterações ocorrem muito rapidamente e, quase sempre, nas suas formas puras, não compensadas. Embora, os mecanismos da circulação extracorpórea convencional e da ECMO possam produzir qualquer tipo de distúrbio do equilíbrio ácido-base, as alterações mais encontradas são a acidose metabólica e a alcalose respiratória. Esta última ocorre, principalmente, quando se usam os oxigenadores com fluxos elevados de gás. Os oxigenadores modernos são ótimos eliminadores de CO₂.

ACIDOSE RESPIRATÓRIA

Na acidose respiratória o quadro laboratorial encontrado é: pH inferior a 7,35,

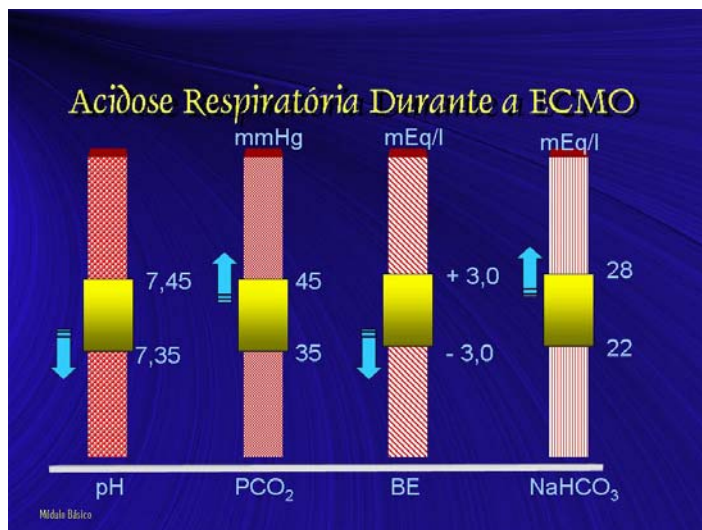


Figura 7.3. Ilustra as variações dos parâmetros do equilíbrio ácido-base na acidose de origem respiratória. Para esse diagnóstico basta verificar o pH abaixo de 7,35 e a PaCO₂ acima de 45 mmHg.

que caracteriza a acidose e o PCO₂ acima de 45mmHg, que caracteriza a retenção de CO₂ no sangue, como a causa primária do distúrbio. Como as bases do sangue são mobilizadas para tamponar o ácido carbônico em excesso, produto da reação do CO₂ com a água, existe um déficit das bases livres e o BE se torna mais negativo, inferior a -3mEq/l. O

total de bicarbonato pode estar pouco acima do normal (22 a 28 mEq/l), se houver tempo para atuação dos mecanismos de compensação.

A retenção de dióxido de carbono e consequente acidose respiratória pode ocorrer durante a assistência com os oxigenadores de membrana, quando há hipoventilação do oxigenador. O fluxo de oxigênio no oxigenador é insuficiente para eliminar todo o CO₂ produzido pelo organismo. O dióxido de carbono acumula nas câmaras do oxigenador e equilibra a sua tensão com o sangue. A PCO₂ do sangue aumenta progressivamente, forma-se um excesso de ácido carbônico, cuja fração dissociada, libera H⁺.

Nos oxigenadores de membranas a retenção de CO₂ pode ocorrer pela administração de gás rico em oxigênio (FiO₂ elevada) porém com fluxo baixo. Nesses casos a PO₂ é normal e a PCO₂ é elevada.

A retenção de CO₂, com produção de acidose respiratória, durante a assistência extracorpórea pode ocorrer ainda por alterações dos oxigenadores, seja por defeitos de fabricação ou por bloqueio das membranas capilares. Uma falha do oxigenador deve ser suspeitada sempre que o aumento do fluxo na linha de gás do oxigenador não reduz a PCO₂ do sangue e corrige a acidose respiratória.

A acidose respiratória pode deprimir o miocárdio e favorecer o aparecimento de arritmias; essa combinação de fatores pode dificultar a recuperação pulmonar ou cardíaca durante a assistência cardiopulmonar. As necessidades de agentes anestésicos e relaxantes musculares aumentam, para manter o mesmo plano anestésico. Pode, ainda, ocorrer sudorese intensa, mesmo no paciente anestesiado e edema cerebral.

A acidose respiratória durante a ECMO deve ser tratada pelo aumento da oferta

de gás ao oxigenador de membranas, sob controle rigoroso da gasometria arterial. O valor do bicarbonato total é normal ou elevado e a administração de bicarbonato de sódio é desnecessária e ineficaz.

ALCALOSE RESPIRATÓRIA

A alcalose respiratória é o distúrbio mais frequente no transcurso da circulação extracorpórea convencional ou modificada (ECMO / ECLS), com qualquer tipo de oxigenador. O fluxo de oxigênio habitualmente instilado no oxigenador é suficiente para oxigenar adequadamente o sangue venoso, porém, excessivo para a eliminação do CO₂, removendo-o em excesso, o que reduz substancialmente a PCO₂.

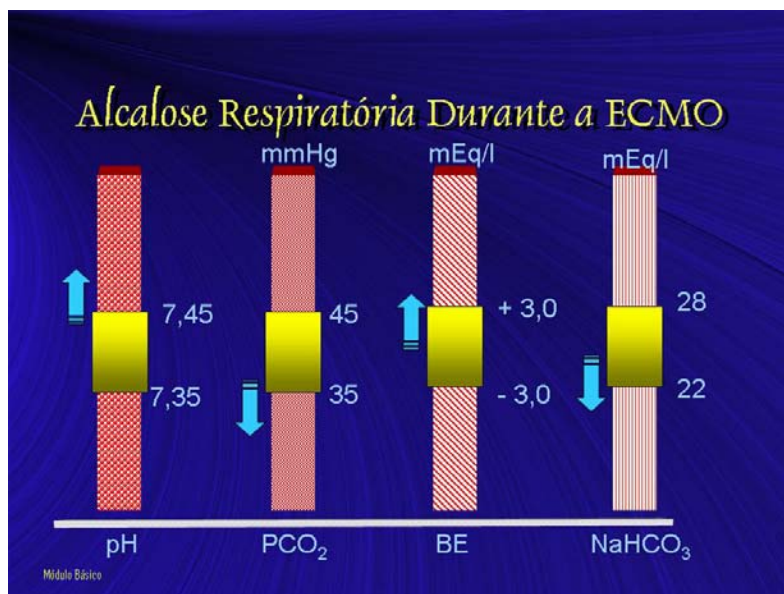


Figura 7.4. Representa as alterações dos parâmetros do equilíbrio ácido-base na alcalose respiratória. O pH elevado e a PaCO₂ abaixo de 35 mmHg são suficientes para o diagnóstico da alcalose de natureza respiratória.

O CO₂ é eliminado para o exterior do aparelho, carregado pelo fluxo de oxigênio que atravessa o oxigenador. O ácido carbônico do sangue diminui e provoca a redução concomitante do bicarbonato.

O quadro laboratorial é representado pelo pH superior a 7,45 e a PCO₂ abaixo de 35 mmHg. O BE se mantém inalterado ou pode elevar-se fracamente; o bicarbonato plasmático se reduz a menos de 22 mEq/l.

A compensação das alterações do equilíbrio ácido-base é demorada e, ao contrário do que se acreditava, o organismo não compensa a alcalose respiratória pela produção de acidose metabólica. Isto apenas ocorre quando a alcalose dura mais de 12 a 18 horas. Pacientes mantidos sob regime de alcalose respiratória não desenvolveram acidose metabólica, como um mecanismo de compensação do distúrbio primário.

A alcalose respiratória é extremamente comum, principalmente quando os fluxômetros de gás usados não são precisos e apenas permitem ajustes de fluxo de 1 em 1 litro; nessas circunstâncias a hiperventilação é a regra. O ajuste correto dos fluxos de oxigênio, para moderar a eliminação de CO₂, apenas pode ser feito quando se utilizam fluxômetros adequados, calibrados em frações de litros, especialmente na assistência respiratória infantil, em que os fluxos de gás são ainda menores.

A alcalose severa, com a PCO₂ abaixo de 25mmHg, especialmente quando prolongada, pode produzir vasoconstrição, que se manifesta com maior intensidade nos vasos cerebrais. Podem resultar em quadros psiquiátricos ou neurológicos de gravidade variável, incluindo convulsões.

Na alcalose respiratória há desvio para a esquerda da curva de dissociação da oxihemoglobina, que corresponde à uma maior afinidade da hemoglobina pelo oxigênio, tornando mais difícil a sua liberação nos tecidos. Nessas condições, embora o sangue arterial esteja completamente saturado e a PO₂ esteja elevada, a liberação de oxigênio nos tecidos pode não ser suficiente para o metabolismo aeróbico, o que causa acidose metabólica, que vai se manifestar, nessas circunstâncias.

cias, pela redução das bases disponíveis (redução do BE).

A alcalose respiratória durante a ECMO é corrigida pela redução do fluxo de gás oferecido aos oxigenadores de membranas.

Um pequeno grau de alcalose respiratória (PCO₂ acima de 28 a 30 mmHg.) é bem tolerado pelo organismo e tem alguns efeitos favoráveis, gerais e cardiovasculares. Há menor necessidade de agentes anestésicos e relaxantes musculares e a função global do coração é melhor. O ritmo sinusal é melhor sustentado e a contratilidade miocárdica é estimulada.

ACIDOSE METABÓLICA

A acidose metabólica se inicia sem interferência respiratória, por aumento da concentração de H⁺, de origem endógena ou exógena. É um distúrbio bastante frequente durante a circulação extracorpórea de longa duração e pode ser produzido por diversas causas. A causa mais comum da acidose metabólica é uma deficiente oxigenação dos tecidos. Os tecidos hipóxicos, se socorrem do metabolismo anaeróbico, cujo produto final é, principalmente, o ácido láctico. O ácido láctico é um ácido fraco, não volátil, e que, portanto, não pode ser eliminado pelo pulmão ou pelo oxigenador. A dissociação do ácido láctico libera íons hidrogênio, que vão contribuir para reduzir o pH do sangue. O outro produto da dissociação do ácido láctico é o íon lactato. O ácido láctico é metabolizado no fígado. Entretanto, na acidose láctica, a sua produção supera a capacidade de metabolização daquele órgão, permitindo o acúmulo no sangue.

O lactato desloca o sódio do bicarbonato; além disso, como mecanismo de compensação, o pulmão aumenta a eliminação de CO₂, para manter o teor de ácidos do sangue. Este último mecanismo inexistente, durante a ECMO.

A redução da oxigenação dos tecidos, que induz ao metabolismo anaeróbico, com produção excessiva de ácido láctico e acidose metabólica, também pode ocorrer quando o fluxo da bomba arterial está reduzido em relação às necessidades do paciente, quando há vasoconstrição de determinados leitos vasculares, quando o sangue arterial não está adequadamente oxigenado ou quando a oxihemoglobina não libera suficiente oxigênio aos tecidos por desvios da sua curva de dissociação.

A vasoconstrição é extremamente comum durante a assistência cardiopulmonar extracorpórea e decorre da liberação de catecolaminas e outros produtos vasoconstritores, estimulados pelo stress do procedimento e pela interação do sangue com as superfícies não endoteliais do circuito da ECMO.

O sangue arterial pode não estar adequadamente oxigenado, por insuficiente fluxo de oxigênio no oxigenador ou por defeitos do sistema de oxigenação do aparelho.

Um aumento da afinidade da hemoglobina pelo oxigênio (desvio para a esquerda da curva de dissociação da oxihemoglobina), que dificulta a liberação do oxigênio nos tecidos pode ser produzido pela excessiva eliminação do CO₂ no oxigenador.

O sangue estocado, bem como seus derivados, tem o pH baixo e acidose metabólica, em consequência da preservação em soluções ácidas, como o ACD ou diferentes formulações do CPD e quando usados no perfusato, devem ser neutralizados adequadamente, para evitar o consumo de bases do sangue do paciente. As soluções cristaloides eventualmente usadas no perfusato, são igualmente ácidas, como as soluções de Ringer ou Ringer lactato, cujo pH varia entre 5,2 e 6,4. O perfusato com estas soluções, também deve ser tamponado, antes do início da assistência cardiopulmonar prolongada. Essa medida é de fundamental importância nos recém nascidos. Estes, como fator adicional, têm elevada concentração de hemoglobina fetal no sangue, cuja afinidade pelo oxigênio é maior do que a da hemoglobina A dos adultos.

Na acidose metabólica o pH está abaixo de 7,35, o PCO₂ está normal e o BE está negativo, com um déficit de bases que varia de acordo com a severidade da acidose.

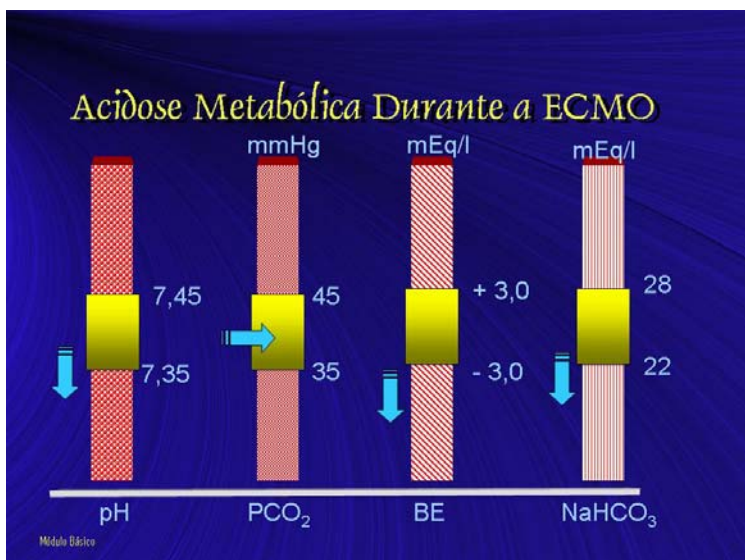


Figura 7.5. Ilustra as alterações dos parâmetros do equilíbrio ácido-base na acidose metabólica. O pH abaixo de 7,35 indica acidose, a PaCO₂ normal indica que o distúrbio não tem origem respiratória e o consumo da reserva de bases e o déficit de bases aumentado confirmam a origem metabólica do distúrbio.

Geralmente o BE oscila, entre -5 e -10. O bicarbonato total também está abaixo de seu valor normal.

A acidose metabólica deprime a contratilidade miocárdica; pode produzir depressão do tonus vascular, arritmias ventriculares e tende a aumentar os sangramentos.

A acidose metabólica pro-

duz, ainda, aumento do potássio extracelular, que altera as suas relações com ou-

tros íons. A acidose metabólica reduz ou abole a resposta aos medicamentos inotrópicos e vasopressores.

A acidose metabólica durante os procedimentos de ECMO é corrigida pela eliminação das possíveis causas de hipóxia tissular e, se necessário, pela administração adicional de bases, como o bicarbonato de sódio, de acordo com o grau de acidose, expresso pelo valor do déficit de bases (BE ou BD). O cálculo da quantidade total de bicarbonato a ser administrada, é feito através de fórmulas, das quais a mais comum é: $\text{Peso} \times \text{BE} \times 0,3 = \text{Bic. sódio (ml da solução a 8,4\%)}$.

A solução de bicarbonato de sódio a 8,4% contém 1 mEq do sal por cada mililitro. A fórmula usada para o cálculo da dose de bicarbonato, fornece a quantidade de miliequivalentes de base bicarbonato, que precisa ser administrada, para tamponar a acidose correspondente ao déficit de bases determinado. Como as fórmulas são apenas aproximações de cálculo e outras medidas visando corrigir a oxigenação tissular são tomadas, usa-se administrar a metade da dose calculada e repetir a gasometria após 10 ou 15 minutos.

Não é raro que a causa da acidose seja a hipóxia das massas musculares, causada pela vasoconstrição que acompanha a perfusão dos tecidos com fluxo linear. Nestes casos a simples administração de vasodilatadores pode corrigir a acidose. A experiência tem demonstrado que, quando se usam vasodilatadores desde o início da assistência cardíopulmonar extracorpórea, é mais raro o desenvolvimento de acidose metabólica.

ALCALOSE METABÓLICA

A alcalose metabólica não é um desvio comum durante a circulação extracorpórea prolongada. Pode ocorrer, contudo, quando se administram bases em excesso aos pacientes, como o bicarbonato de sódio.

Quando se administram diuréticos, há grande eliminação de líquidos e de eletrólitos, principalmente o potássio. A eliminação do potássio acarreta eliminação concomitante de íon H^+ pela urina e retenção alternativa do íon bicarbonato, que produz a alcalose metabólica. Este mecanismo, entretanto, é lento e observado apenas em pacientes em uso prolongado dos diuréticos.

Na alcalose metabólica o pH está acima de 7,45, o PCO_2 está normal e há excesso de bases, com BE positivo, superior a +3. O bicarbonato também está elevado, acima de 28 mEq./l.

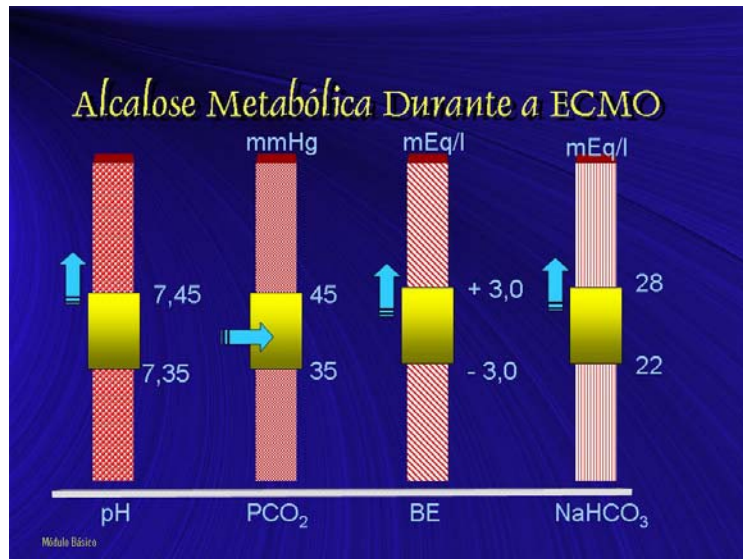


Figura 7.6. Ilustra as alterações dos parâmetros do equilíbrio ácido-base na alcalose metabólica. O pH acima de 7,45 indica alcalose, a $PaCO_2$ normal mostra que o distúrbio não é respiratório e o aumento do excesso de bases e do bicarbonato confirmam a origem metabólica do distúrbio.

De um modo geral a alcalose metabólica é branda, bem tolerada, e não necessita de qualquer tratamento específico.

GASOMETRIA ARTERIAL E VENOSA

Os valores normais do pH e dos gases do sangue referidos no exame dos principais distúrbios do equilíbrio ácido-base, referem-se ao sangue arterial, já oxigenado e modificado nos pulmões ou nos oxigenadores. O sangue arterial coletado para o exame após atravessar o oxigenador nos informa a PO₂ que vai ser oferecida ao paciente e nos informa ainda sobre o funcionamento adequado do oxigenador em relação às trocas gasosas.

O sangue venoso, que conduz os restos metabólicos celulares, coletados no sistema capilar, tem valores diferentes do sangue arterial, e não menos importantes. A análise do sangue venoso normal, deve mostrar os seguintes resultados:

pH= 7,27 a 7,39

PCO₂= 40 a 50mmHg

PO₂= 35 a 40mmHg

HCO₃= 22 a 28mEq/l

BE= ± 3,0

SO₂= 70 a 75 (Saturação de oxigênio)

A monitorização dos parâmetros do equilíbrio ácido base, pH, PCO₂ e BE é fundamental, durante a assistência cardiorpulmonar extracorpórea prolongada. Medidas simples, como a escolha de fluxômetro de gás adequado, cálculo dos fluxos de perfusão e cuidadosa monitorização dos aparelhos em uso, contribuem para

minimizar os efeitos da ECMO sobre os mecanismos reguladores do equilíbrio ácido-base do organismo. A análise dos gases e do pH do sangue, indica a presença, a natureza e a severidade das alterações do balanço ácido-base e possibilita a correção das suas alterações. A maioria desses distúrbios pode ser prevenida ou, pelo menos, minimizada, pela criteriosa condução da ECMO.

MONITORIZAÇÃO DO pH E DOS GASES SANGUÍNEOS

As gasometrias arterial e venosa devem ser criteriosamente monitorizadas durante a circulação extracorpórea prolongada. A gasometria arterial oferece informações sobre o estado ácido-base do sangue que vai perfundir os tecidos do paciente e a qualidade da sua oxigenação; a amostra arterial informa com precisão a qualidade da função do oxigenador. A gasometria venosa, ao contrário, informa sobre a qualidade da oxigenação dos tecidos, o nível de extração de oxigênio pelo organismo do paciente, a adequácia do fluxo da ECMO e o estado ácido-base.

A coleta de amostras para gasometria deve ser feita a intervalos regulares, ditados pelo transcurso do procedimento e pelos protocolos do serviço. O exame de novas amostras deve, também, ser providenciado após a correção de qualquer alteração encontrada.

Modernamente utilizam-se máquinas capazes de analisar continuamente a oxigenação e o estado ácido-base do sangue, durante a circulação extracorpórea prolongada, com o objetivo de monitorizar as tendências, ao invés das amostras isoladas. Há vantagens e desvantagens nessa tecnologia capazes de justificar o seu uso, apesar dos custos elevados. Além disso, os transdutores podem ser de

difícil calibração e podem apresentar ocasionais erros de leitura. Entretanto a monitorização das tendências é, sem dúvidas, mais atraente que a monitorização de amostras, que refletem apenas o estado do sangue, no momento da coleta da amostra. Se, por exemplo, em uma amostra colhida aos 45 minutos após o início da ECMO, encontrarmos o pH de 7,20, esse valor poderá representar uma de duas situações opostas. O ponto 7,20 pertence à uma curva de pH em queda, ou seja, o PH era de 7,35 alguns minutos antes da coleta da amostra e continua decrescendo. Ou, ao contrário, o ponto 7,20 pertence à uma curva de pH em ascensão, ou seja, o pH era de 7,15 alguns minutos antes da coleta da amostra, e continua em elevação. No primeiro caso, a correção da causa da acidose é imperativa, enquanto no segundo caso, a simples observação da tendência é suficiente. A monitorização das tendências permite alterações dos parâmetros da ECMO, capazes de impedir o desenvolvimento dos distúrbios do equilíbrio ácido-base, enquanto a análise de amostras, permite a identificação e correção dos distúrbios existentes.

As máquinas de última geração substituem com vantagem a coleta de amostras seriadas. Seu único inconveniente, entretanto, é o preço, incluindo-se os custos de uso e manutenção.

A monitorização do equilíbrio ácido-base do organismo é um componente essencial dos procedimentos de assistência cardiopulmonar extracorpóreos de longa duração. Especialmente logo após o início da ECMO, a correção dos distúrbios existentes pode significar a diferença entre o sucesso e o insucesso do procedimento como um último recurso terapêutico.