



Adaptações Fisiológicas de Mamíferos para Mergulhos em Grandes Profundidades

Aline Pomnitz Piccini

Brasília – 2003

Centro Universitário de Brasília
Faculdade de Ciências da Saúde
Bacharelado em Ciências Biológicas

Adaptações Fisiológicas de Mamíferos para Mergulhos em Grandes Profundidades

Aline Pomnitz Piccini

Monografia apresentada como
requisito para conclusão do curso de
Biologia do Centro Universitário de
Brasília

Orientação: Prof^o Cláudio Henrique Cerri e Silva
Prof^o Marcelo X. A. Bizerril

Brasília – 1º semestre/ 2003

RESUMO

O trabalho consta de uma revisão bibliográfica sobre as adaptações de mamíferos para mergulhos em grandes profundidades mostrando quais as adaptações referentes, entre outros, ao metabolismo, sistemas respiratório e circulatório e, quais as grandes conquistas fisiológicas dos animais que têm respiração aérea e, no entanto, mantêm uma vida submersa, sem que, para isso, corra risco de sofrer alguma patologia referente à pressão exercida sobre o organismo na água, a pressão hidrostática. As adaptações descritas envolvem ainda os sistemas ácido-base e tampão que estão relacionados com a manutenção do pH normal do sangue. São citadas ainda, alterações no metabolismo do animal mergulhador e as funções da mioglobina no músculo estriado já que, esta, auxilia no armazenamento de oxigênio quando há necessidade. O termo adaptação está relacionado com a capacidade que todo ser vivo tem de se ajustar ao ambiente em que vive; são características de estrutura e funcionamento que moldam o organismo às condições do seu meio ambiente. Essa íntima associação entre indivíduo e meio ambiente é resultado do princípio de seleção natural. Os indivíduos bem ajustados ao meio sobrevivem e se reproduzem e, dessa forma os atributos hereditários que favorecem a sobrevivência no meio são repassados aos seus descendentes e se preservam na população. Aqueles indivíduos que não conseguem responder a perturbações ambientais morrem antes da idade reprodutiva ou produzem menos descendentes, reduzindo assim a proporção de seus caracteres na população. Sendo assim, a seleção natural direciona a evolução de determinada espécie de acordo com as pressões ambientais para manter-se num ambiente que está modificando constantemente.

Palavras-Chave: animais mergulhadores, fisiologia do mergulho, hipoxia, metabolismo, hemoglobina.

Sumário

- 1- Introdução	5
- 2 - Efeitos da Pressão Hidrostática no Sistema Respiratório..	7
- 2.1 - Mudanças de pH.....	8
- 2.2 – Sistema Tampão.....	8
- 2.3 – Patologias.....	9
- 2.4 – Hipoxia.....	11
- 2.5 – Reações Enzimáticas.....	12
- 3- Efeitos no Sistema Circulatório.....	14
- 3.1 – Mioglobina.....	15
- 4- Metabolismo.....	16
- 5 – Conclusão.....	18
- 6 – Referências Bibliográficas.....	19

1 -Introdução

De todos os diferentes ambientes da Terra, as profundezas dos oceanos apresentam as mais complexas condições de sobrevivência da biosfera. Sendo, portanto, preciso que diferentes adaptações ocorram nos organismos que lá habitam, para que estejam de acordo com o ambiente, como pressão hidrostática, a baixa temperatura, bem como a ausência de luz, são de extrema importância para se compreender as adaptações fisiológicas envolvidas no mergulho (Puleo 2001).

Todos os principais grupos taxonômicos de animais terrestres têm representantes que podem viver períodos mais ou menos prolongados embaixo d'água. Os insetos, aracnídeos assim como todas as classes de vertebrados terrestres possuem espécies no habitat aquático.

A vida submarina é possível tanto para pequenos animais que tomam o oxigênio da água por difusão do meio como também para animais de maior tamanho, cuja pele é extremamente permeável e vascularizada. A pele coberta de quitina ou queratina, como na maioria das espécies animais terrestres torna difícil a difusão de oxigênio. De modo geral, os animais terrestres que podem viver embaixo d'água obtêm oxigênio subindo periodicamente para superfície e, por isso, podem aumentar o tempo de imersão valendo-se, de forma racional, isto é, eficiente, desse gás absorvido(Harding 1993).

Dos animais que possuem sistema respiratório traqueal aparecem os que obtêm oxigênio do ar e os que absorvem oxigênio diluído na água. Algumas espécies de insetos podem, ao submergir, levar uma bolha de ar entre as asas, as quais atuam como brânquias de onde extraem, gradualmente, o oxigênio que se difunde pela água. O nitrogênio molecular presente na bolha, por sua lenta velocidade de difusão para o exterior, funciona como estabilizador do sistema, mantendo a bolha por mais tempo intacta (Kooyman 1983).

Embora o ar seja extremamente leve, não é desprovido de peso. O peso que exerce sobre nós, a totalidade da atmosfera, denomina-se pressão atmosférica. Cada pessoa suporta em média sobre os ombros o peso de cerca

de 1 tonelada de ar, porém não sentido, já que o ar é um gás e a força da pressão exerce-se em todas as direções. O peso normal do ar ao nível do mar é de $1\text{Kg}/\text{cm}^2$. Porém, a pressão atmosférica desce com a altitude. A 3000 m, é de cerca de $0,7\text{ kg}/\text{cm}^2$. A 8848 m, a altitude do monte Everest, a pressão é de apenas $0,3\text{ Kg}/\text{cm}^2$.

No entanto, a dificuldade básica em explorar o ambiente oceânico é a pressão da água. Por causa da vasta diferença entre as densidades do ar e da água, a única pressão que a atmosfera expressa sobre a superfície da Terra é de apenas 1 atm a 760 mmHg. Entretanto, abaixo do nível do mar, essa pressão se altera de tal forma que a cada 10 m de profundidade aumenta-se 1 atm, ou seja, em 11000 metros abaixo, verifica-se uma pressão de 1100 atm. Desse modo, por exemplo, uma recordista em mergulho apnéico, Tanya Streeter, é capaz de suportar até pouco mais de 70 metros abaixo já sentindo pressão sobre o tórax e nos ouvidos. A essa profundidade, uma lata de refrigerante é passível de ser amassada por completo e o pulmão vê-se contraído para apenas um oitavo de seu volume normal (Puleo 2001).

Todos os efeitos da pressão, seja preenchimento de gás, seja de água nos espaços, são resultado de mudanças de volume. O exemplo mais claro dos efeitos da pressão é de uma bolha de gás e, segundo a lei de Boyle, o volume ocupado por um gás é inversamente proporcional a pressão exercida, portanto, faz com que um organismo a uma grande profundidade estabeleça adaptações a fim de não sofrer reduções de volume interno dos órgãos. As adaptações que prolongam o tempo em que o animal pode resistir durante um mergulho estão associadas ao fato de o animal ser de metabolismo aeróbico ou anaeróbico bem como à quantidade de oxigênio armazenado (Costa 1999). Dentre essas adaptações, incluem-se efeitos mecânicos de pressão assim como os problemas associados com o aumento da solubilidade e, em alguns casos, a toxicidade do N_2 e do O_2 em alta pressão.

Os estudos referentes a mergulhos de grandes profundidades começaram, há cerca de trinta anos, com o biólogo marinho Gerald Kooyman, da *Scripps Institution of Oceanography*. Kooyman descobriu que as focas mergulhavam muito mais profundo do que se pensava ser possível

resistir. Desde então, os cientistas vêm explorando as habilidades de mergulho de animais marinhos, de leões marinhos a pingüins, não só com o intuito de pesquisar a fisiologia dos animais e responder como funciona a respiração em lugares com oxigênio limitado, como também para realizar estudos médicos relativos a ataques cardíacos e derrames. No decorrer dos tempos, conforme aumentavam os estudos referentes ao mergulho, tornou-se claro que uma foca, ao mergulhar, desacelera o batimento cardíaco e o fluxo sanguíneo concentra-se nos órgãos que mais necessitam de oxigênio: o coração e o cérebro (Harding 1993).

Assim, o objetivo geral desta pesquisa é conhecer a capacidade adaptativa dos mamíferos em mergulhos a grandes profundidades e tem como objetivo específico a descrição do metabolismo, o sistema respiratório e circulatório de animais que têm respiração aérea e vivem submerso e caracterizar as patologias desses animais.

2 - Efeitos da Pressão Hidrostática no Sistema Respiratório

A habilidade do mergulho dos mamíferos reflete adaptações fisiológicas e aclimatização. As mais profundas e gerais mudanças são observadas nos sistemas cardiovascular e respiratório. Somers (2003), em seu artigo, mostrou uma revisão de Strauss excelente dessas mudanças adaptativas e seus mecanismos fisiológicos. Uma ênfase especial foi dada à presença ou ausência dessas adaptações nos mergulhadores humanos.

Mamíferos aquáticos exibem múltiplas alterações e ajustes no sistema respiratório durante os mergulhos. Muitas dessas alterações também podem ser observadas em mergulhadores humanos treinados. As alterações respiratórias mais notáveis em todos os mamíferos aquáticos são: Adaptações para resistir os efeitos da compressão torácica; alterações que reduzem ou eliminam a possibilidade de doença descompressiva, ou seja, bolhas de nitrogênio do sangue ou tecidos; adaptações que tornam o organismo menos responsivo aos efeitos da hipóxia e hipercapnia. Essas alterações que melhoram a eficiência da ventilação durante o intervalo na superfície e a fase de recuperação no mergulho em apnéia.

As alterações cardiovasculares observadas nos mamíferos aquáticos são excepcionalmente evidentes. Em contraste, as adaptações respiratórias que tendem a ser um instrumento de proteção dos mamíferos nos problemas associados à pressão, as alterações cardiovasculares são responsáveis por aumentar o tempo de mergulho. O reflexo de imersão, marcado pela desaceleração do coração, é a resposta mais bem documentada apresentada por todos os mamíferos aquáticos, incluindo os humanos. Bradicardia, por si só, seria prejudicial para o organismo. Então, existem 4 fatores compensadores importantes que complementam a bradicardia. Eles são: vasoconstrição periférica e desvio de sangue das extremidades para as grandes veias, coração, pulmões e cérebro; alterações morfológicas do sistema vascular; aumento na habilidade dos tecidos não vitais em funcionar anaerobicamente e manter-se isolados até que o mergulho seja completado; aumento na habilidade de carregar, estocar e utilizar O₂.

Adaptações ao acúmulo de CO₂

Mamíferos aquáticos são menos sensíveis a baixas concentrações de O₂ alveolar e a altos níveis de CO₂ que os mamíferos não aquáticos. Adaptações análogas são observadas em apneístas treinados. Somers (2003) citou ainda que Schaefer observou que, mergulhadores treinados têm uma diminuição significativa da resposta ventilatória de 10.5% de CO₂, melhor utilização de O₂, melhor aceitação de débito de O₂ e aumento da tolerância à elevação de CO₂ nos tecidos quando comparados a não mergulhadores. Essas respostas desaparecem 3 meses após a interrupção dos mergulhos. Isso sugere que o condicionamento físico e a exposição a repetidos mergulhos são necessários para o desenvolvimento e a manutenção dessas adaptações.

Adaptações que melhoram o tempo de recuperação

Os mamíferos aquáticos têm ajustes respiratórios que melhoram a eficiência da troca de ar e reduzem o tempo de recuperação após um mergulho estressante. A função da troca respiratória humana é relativamente ineficiente quando comparada a outros mamíferos. Os golfinhos e focas têm a

freqüência respiratória lenta, porcentagem de utilização de O₂ e volumes pulmonares muito melhores que os encontrados nos humanos. Assim como o volume total se aproxima da capacidade pulmonar total, a ventilação torna-se altamente eficiente, compensando a freqüência respiratória baixa. A freqüência respiratória nos golfinhos e focas é de 2 a 4 e de 3 a 4 rotações por minuto (rpm), enquanto nos humanos é de 15 rpm.

Os efeitos dessas características são quatro: primeiro, a baixa freqüência respiratória e o largo volume de troca de gás que, a cada ciclo, reduz o gasto de energia da respiração. Segundo, a elevada utilização de O₂ aumenta a eficiência de cada respiração e elimina a necessidade de aumentar a freqüência respiratória. Somers (2003) relata o aumento significativo nos volumes de reserva inspiratório e total e capacidades vital e pulmonar total nos mergulhadores treinados e experientes. Essas alterações significantes aumentam a eficiência da troca respiratória. Grupos com altas e baixas respostas ventilatórias podem ser encontrados nos humanos. O grupo com baixa resposta é caracterizado por grandes volumes totais, baixas freqüências respiratórias e melhor tolerância a elevação das tensões alveolares de CO₂. Terceiro, a insuflação completa do pulmão auxilia na flutuabilidade durante a natação na superfície e no repouso, reduzindo o gasto energético. Quarto, o aumento da eficiência respiratória está relacionado à conservação do calor corporal.

Portanto, em se tratando da pressão hidrostática, os sistemas que suprem oxigênio e eliminam dióxido de carbono são os sistemas cardiovascular e respiratório. Eles participam igualmente na respiração sendo o respiratório responsável pelas trocas gasosas, captação de O₂, enquanto o cardiovascular se encarrega de transportar os gases no sangue entre os pulmões e as células.

As células do organismo utilizam continuamente o oxigênio para as reações metabólicas que liberam energia a partir das moléculas dos nutrientes e produzem ATP e, ao mesmo tempo, essas reações liberam dióxido de carbono (Tortora 2001).

Seria esperado que mamíferos mergulhadores que ficam expostos a uma deficiência relativa de oxigênio quando mergulham, pudessem obter vantagem se o sangue tivesse alta afinidade pelo O₂. Todavia, nesses animais, o sangue possui uma baixa afinidade. Isso se explica por que a tomada de O₂ ocorre em circunstâncias semelhantes àquelas de outros mamíferos, para isso não é preciso uma afinidade especialmente alta pelo oxigênio. Durante o mergulho, é importante a liberação de oxigênio para os tecidos, especialmente do sistema nervoso central e músculo cardíaco, para tanto, uma baixa afinidade do sangue é bastante vantajosa.

2.1. - Mudanças de pH

À medida que a respiração cessa no organismo, o pH sanguíneo diminui progressivamente, acumulando as concentrações de CO₂, H⁺CO₂ e H⁻.

Como é sabido, a respiração desempenha relevante função na manutenção do pH do sangue, ou seja, um aumento na concentração de dióxido de carbono nos fluidos corporais, como resultado da respiração celular, faz diminuir o pH, tornando, assim, o sangue mais ácido.

Na equação abaixo, pode-se perceber a importância do equilíbrio ácido e, sendo uma reação reversível, nota-se que, sentido inverso, haverá diminuição das concentrações de dióxido de carbono nos fluidos corporais, causando aumento do pH. Ocorrerá aumento do pH devido à junção de dois íons, o de hidrogênio e o de bicarbonato resultando em um ácido, o carbônico (ambiente ácido, pH diminuído):



Os ácidos envolvidos nessa equação têm uma grande importância no que diz respeito ao equilíbrio do sistema tampão do organismo que será melhor relatado em seguida.

¹ Dióxido de carbono (CO₂) combinado com água resulta na combinação chamada ácido carbônico (H₂CO₃) que, dissociado, origina um íon de hidrogênio (H⁺) mais um íon de bicarbonato (HCO₃⁻).

O equilíbrio do pH nos fluidos corporais pode acontecer devido a uma alteração da taxa e intensidade respiratória, ou seja, sendo aumentadas, mais CO₂ é exalado, ocorrendo um aumento do pH sanguíneo. Uma taxa respiratória mais baixa significará menos CO₂ exalado, causando a diminuição do pH sanguíneo e eminente patologia (Tortora, 2001).

2.2. – Sistema Tampão

A maioria dos sistemas tampões consiste de um ácido fraco e uma base fraca que funcionam para evitar mudanças drásticas no pH de um fluido corporal e auxiliam na manutenção da homeostase. Um ácido forte dissocia-se em H⁺ mais facilmente que um ácido fraco, dessa forma, os ácidos fortes baixam mais o pH que os ácidos fracos porque contribuem com mais H⁺ (Tortora 2001).

Existem no organismo diferentes sistemas tampões como o ácido carbônico-bicarbonato, usado para tamponar bases fortes e transformá-la em bicarbonato de sódio (NaHCO₃); sistema de fosfato, que auxilia a regulação do pH em glóbulos vermelhos sanguíneos; sistema protéico, o mais abundante no plasma e nas células do corpo e o sistema hemoglobulínico.

O sistema tampão hemoglobulínico tampona ácido carbônico no sangue. Quando o sangue move-se da extremidade arterial de um capilar para a extremidade venosa, o CO₂ liberado pelas células do corpo entra nos eritrócitos e combina-se com a água para formar ácido carbônico². Simultaneamente, a oxiemoglobina (HbO₂) libera seu O₂ para as células do corpo, e torna-se hemoglobina reduzida, com carga negativa, ou seja, um ânion que atrairá o H⁺ do ácido carbônico e tornar-se-á um ácido ainda mais fraco.

O sistema de tampão fosfato é especialmente importante nos fluidos tubulares dos rins. Com esse sistema, o rim auxilia na manutenção do pH normal do sangue pela acidificação da urina (Tortora 2001).

² Equação vista anteriormente.

1.3 – Patologias

Mamíferos marinhos têm uma vantagem no que diz respeito a patologias. Efetivamente, ao mergulhar, prendem a respiração de forma que guardam em seus pulmões uma quantidade limitada, embora suficiente de ar, evitando problemas com acúmulo de N_2 . Desse modo, permitem, tais mamíferos marinhos, que seus pulmões entrem em colapso durante os primeiros instantes do mergulho. Por meio de tal expediente, o ar é levado a um ponto de absorção de gases que não ocorre sob pressões elevadas. Conseqüentemente, as tensões de N_2 e O_2 no sangue permanecem relativamente baixas durante o mergulho, evitando-se, assim, narcose de nitrogênio, descompressão e oxigênio tóxico (Costa 1999).

Leões marinhos e focas armazenam oxigênio em seus pulmões a fim de permanecerem muito tempo em mergulho. Muitos desses animais fazem repetidos mergulhos a profundidades significantes durante longos períodos, até mesmo durante horas ou dias. Nesses mergulhos, durante os quais permanecem mais submersos do que na superfície, tornam possível o acúmulo de N_2 nos tecidos.

Os sintomas da descompressão foram descritos em humanos depois de mergulhos repetidos e prolongados. Em mamíferos marinhos, por outro lado, não se pode afirmar se, em mergulhos repetidos, retêm N_2 o suficiente a fim de causar bolhas e, se ocorre, ou têm habilidade especial de retirar o N_2 ou têm tolerância à formação das bolhas (Paulev 1965).

É importante mencionar ainda, que mamíferos marinhos têm as paredes do peito complacentes, o que permite que o pulmão esvazie completamente e possua estruturas especializadas em consentir que os alvéolos se esvaziem primeiro, em seguida, as zonas terminais da passagem respiratória. Essas estruturas podem, ainda, ajudar no novo enchimento dos pulmões (Costa 1999).

No que diz respeito ao ouvido médio, os mamíferos marinhos têm cavidades cavernosas especializadas, as quais, presume-se, se enchem de sangue conforme o animal mergulha e, então, preenchem de ar os espaços. De acordo com Costa (1999), mamíferos marinhos normalmente não

mergulham fundo o suficiente para causar qualquer tipo de sintoma de síndrome nervosa das altas pressões (HPNS) que é o resultado de exposição a grandes pressões parciais de Hélio para respiração em mergulhos e, ocorre em profundidades superiores aos 152 metros.

A decompressão do mergulhador é dependente do gás inerte respirado (nitrogênio ou hélio), da pressão parcial e do tempo e não apenas da profundidade e do tempo. Ao reduzirmos a pressão parcial do gás inerte, reduzimos também a quantidade deste gás inerte, que é absorvida pelos tecidos e, por conseguinte, diminuímos as obrigações descompressivas.

Alguns desses animais, no entanto, descem até 1600m de profundidade sem apresentar nenhum problema. Humanos, tanto quanto outros primatas, demonstram tremores a profundidades de 14 ou 15 atm e convulsões a partir de 50 atm.

Embora seja difícil imaginar que focas e baleias rotineiramente mergulham a essas profundidades sem experimentarem fatores de risco relacionados com sintomas de HPNS, não existem documentos que comprovem, em qualquer aspecto, seu potencial de tolerância à síndrome.

A contração esplênica, que é a contração do baço a fim de liberar o sangue que ali se encontra, aumentando assim a quantidade de sangue circulante - em casos de emergência - em um focídeo confirma, justamente, que o mergulho do elefante marinho resulta numa rápida contração do baço e diminuição da concentração de células vermelhas do sangue (RBC) no sistema venoso. Além disso, com a imersão induzida da face, há contração do baço acompanhada de um aumento agudo do volume da cavidade hepática, significando a transferência das células vermelhas do sangue para o músculo controlador dessa cavidade. A mais forte correlação entre esses acontecimentos sugere assim, um mecanismo que é capaz de controlar a distribuição de células vermelhas do sangue na circulação em geral.

A transferência de sangue do baço para a cavidade explica a disparidade entre o tempo do mergulho com contração esplênica, de um a três minutos e a ocorrência do pico de hematócrito, o qual, por sua vez, se dá em um período de quinze a vinte minutos (Thornton *et al* 2001).

2.4. - Hipoxia

São conhecidas as similaridades entre os mecanismos da fisiologia humana e as adaptações para tolerância em momentos de hipoxia. Por hipoxia entende-se, segundo Tortora (2001), uma deficiência do O₂ no âmbito tecidual e que pode ser causada por uma pO_2 ³ baixa no sangue arterial, como nas altitudes elevadas; pouca hemoglobina funcionante no sangue, como na anemia, incapacidade do sangue de transportar o O₂ aos tecidos rápido o suficiente para atender as necessidades, no caso de incapacidade dos tecidos em usar o O₂ apropriadamente.

Estudos recentes relacionados com a origem e a evolução de homínídeos mostram que a espécie humana estava adaptada a ambientes que ficavam cada vez mais secos e mais altos e eram favorecidos pela capacidade de resistir a momentos de hipoxia (Hochachka *et al* 1997). Uma pessoa com hipoxia prolongada pode desenvolver cianose, uma coloração azul-arroxeadada na pele, unhas e nas túnicas mucosas. Independentemente da causa, a hipoxia estimula os rins a acelerarem a liberação de eritropoietina, hormônio que circula através do sangue até a medula óssea, onde acelera a produção de glóbulos vermelhos, a eritropoiese.

A porcentagem de glóbulos vermelhos no sangue é chamada de Hematócrito. Uma queda significativa no hematócrito constitui anemia, no entanto, a média de hematócrito de organismos que vivem em condições de pressões muito altas como no caso de animais mergulhadores, costuma ser mais alta que animais terrestres (Tortora 2001).

Estes traços de adaptações aparecem em vários níveis de organização e é o que leva a cinco respostas do sistema respiratório que podem ser a chave para a adaptação para hipoxia: 1) uma abrupta HVR (resposta de ventilação hipóxica) mediado pelo sensor de O₂ do seio carótido e, servindo contra o potencial de alcalose que levará a uma hiperventilação;

³ Entende-se por pO_2 a pressão parcial de oxigênio, já que cada gás, em uma mistura de gases tem sua própria pressão e comporta-se como se nenhum outro gás estivesse presente e, essa pressão parcial é designada como p . As pressões parciais dos gases são importantes para determinar o movimento de oxigênio e dióxido de carbono no corpo.

2) resposta hipóxica vaso constritora dos pulmões mediada pelos sensores de O₂ vascular que funciona para minimizar os riscos de hipertensão pulmonar; 3) regulação do crescimento vascular endotelial expresso pelos sensores de O₂ vascular, angiogênese e, ainda, aumenta o volume de sangue circulante; 4) regulação da expressão de eritropoietina mediado pelos sensores de O₂ renal, eritropoiese, e aumento de volume de RBC (células vermelhas do sangue) capacitadas para carrear de O₂; e 5) ajuste das passagens metabólicas para alterar o fluxo de fluidos essenciais no músculo esquelético e atenuar as concentrações de enzimas especializadas em metabolismo aeróbico e ainda, alterar as razões de metabolismo glicolítico/mitocondrial (Hochachka *et al* 1997).

2.5. - Reações Enzimáticas

Os efeitos da pressão hidrostática na velocidade dos processos fisiológicos e bioquímicos obedecem a uma constante relação exponencial.

A sensibilidade de uma reação enzimática à pressão pode depender da temperatura, como tratado anteriormente, do pH, da força iônica e decomposição de sal na solução.

Muitos estudos sobre efeitos de pressão não atentam para a simulação das condições fisiológicas. Mesmo com essas limitações algumas citações podem ser feitas, como por exemplo: atividades enzimáticas frequentemente são mais fortes quando afetadas pela pressão (Somero 1990); a pressão age diferentemente sobre enzimas, já que estimula algumas reações enquanto que inibe outras. Além disso, a imposição sobre a mudança de pressão em um organismo pode afetar não somente a taxa total de atividade metabólica como também as atividades relativas a outras passagens metabólicas.

Um aumento no período de exposição à água de uma cadeia de proteína pode levar a uma constrição do líquido que se encontra externo a essa cadeia e ainda, diminui o volume do sistema. Esses tipos de mudanças de volume acompanham muitas das alterações que ocorrem na conformação

da proteína, por exemplo, pode ocorrer durante uma catálise ou ligação ao substrato (Prosser 1990).

Outro exemplo de estrutura dependente do volume aquoso é a dissociação de ácidos e bases fracas sob elevada pressão. Por causa de um aumento significativo no total de números de partículas carregadas em uma solução aquosa leva, normalmente, a um decréscimo no volume do sistema, aumentando assim, a pressão favorecendo a dissociação de ácidos fracos. O efeito da pressão no equilíbrio ácido-base varia consideravelmente entre ácido e base e, essa diferença reflete na rede de mudança do número de partículas carregadas na solução.

As mudanças de volume podem vir acompanhadas de cada um dos passos da seqüência da cadeia catalítica de cada reação enzimática: leva de ligantes (substrato, cofatores e moduladores) para a enzima, a ativação do complexo enzima-substrato e a liberação de produtos com a terminação da reação catalítica.

A leva de ligantes às proteínas parece ser especialmente sensível à pressão, provavelmente por que, geralmente, isso muda a conformação da proteína e do estado de hidratação dos reagentes (Somero 1990).

3 - Circulação

O sistema cardiovascular é equipado com um simples mecanismo de pressão regulatória. Teoricamente, segundo Rushmer (1970), um sistema como esse deve assegurar prontidão em compensação no caso de qualquer mudança. Com essa extrema estabilidade do sistema arterial, a pressão é alcançada constantemente em animais e homens que, por exemplo, estejam sob anestesia cirúrgica. Nessas condições, a pressão sistêmica arterial resiste constante durante extensos períodos de tempo a não ser que o nível de anestesia mude por efeito externo.

Geralmente, os ajustes do fluxo sangüíneo são acompanhados pelo aumento das atividades dos tecidos ou órgãos impostos a uma pequena quantidade de estresse na capacidade do sistema cardiovascular. Exercícios fazem com que o sistema cardiovascular tenha como principal atividade

assegurar fluxo para os vasos periféricos. Nos homens, a liberação cardíaca durante os exercícios é linearmente relacionada com o consumo de oxigênio, que, por sua vez, atinge 250 cc em um homem em repouso, enquanto que, durante exercícios, chega a atingir 5350 cc (Rushmer 1970). Já as necessidades teciduais são suprimidas com aumento de oxigênio extraído do fluxo sanguíneo.

A circulação e os músculos esqueléticos diminuem conforme o ácido láctico permanece acumulado nessas zonas e não afeta aos outros tecidos. A pressão parcial do CO₂ eleva-se ligeiramente como consequência da presença de poucas quantidades de O₂ de soluções tampão do sangue.

O equilíbrio ácido-básico geral do corpo é mantido por meio do controle da concentração de H⁺ nos fluidos corporais, especialmente nos fluidos extracelulares. Uma mudança no pH sanguíneo que leva a alcalose ou acidose pode ser compensada para que volte ao normal. A compensação refere-se à resposta fisiológica ao desequilíbrio ácido-básico que tenta normalizar o pH. A compensação respiratória ocorre dentro de minutos, mas se o organismo apresenta um pH alterado devido a causas respiratórias, mecanismos metabólicos (excreção renal de H⁺ ou reabsorção de HCO₃⁻), podem compensar a alteração (Tortora 2001).

A acidose e alcalose afetam o corpo de diferentes maneiras e um deles é a depressão do sistema nervoso central através da depressão da transmissão sináptica. Um pH sanguíneo abaixo de 7 causa desorientação e coma. Por outro lado, um dos efeitos da alcalose é a hiperexcitabilidade do sistema nervoso através da facilitação da transmissão sináptica que ocorre no Sistema Nervoso Central e nervos periféricos. Quando os impulsos não são estimulados, podem causar espasmos musculares, convulsões e possível morte.

Os vasos sanguíneos dos diferentes leitos vasculares, diante de vasodilatadores locais, disponibilizam maior fluido sanguíneo para os órgãos vitais, como o coração e o cérebro (Portilla 1980).

Durante o processo evolutivo, adaptações morfológicas e fisiológicas foram necessárias aos ancestrais das baleias e golfinhos para que

eles se adaptassem ao ambiente aquático. Hoje os cetáceos representam o maior e mais adaptado grupo de mamíferos que retornou à vida aquática. Dentre as principais adaptações, temos:

Transformação da forma externa do corpo em uma forma hidrodinâmica, como a dos primitivos vertebrados aquáticos. Houve o encurtamento das vértebras cervicais e, com isso, o desaparecimento do pescoço. A parte anterior do crânio alongou-se e a narina migrou para o topo da cabeça. Os cetáceos podem respirar sem tirar os olhos do meio aquático, tomando cuidado com a aproximação de predadores ou outras ameaças, ou mesmo evitando perder uma presa de vista. Toda a caixa craniana se modificou.

Os membros anteriores transformaram-se em nadadeiras. Os membros posteriores regrediram. Vestígios destes membros podem ser encontrados inseridos na musculatura de algumas espécies de baleias e de golfinhos.

A cauda assumiu importante papel locomotor. Ela é horizontal e formada por dois lobos sem estrutura óssea e constituídos por tecido conjuntivo denso.

O pênis dos machos e as glândulas mamárias das fêmeas encontram-se alojados internamente e não há pavilhão auditivo para captar sons. Assim não existem partes protuberantes do corpo que atrapalhem seu movimento causando atrito com a água.

Ausência ou escassez de pêlos, que em contato com a água os tornariam lentos. Algumas espécies (jubarte, franca e cinzenta) apresentam pêlos na região da cabeça, muito provavelmente funcionando como estruturas sensoriais – são chamados de *vibrissae*.

Para resolver o problema do controle da temperatura corpórea, os cetáceos apresentam uma camada de gordura que reveste o corpo sob a pele. Ela é um isolante térmico que também funciona como estrutura de reserva e auxilia na flutuabilidade.

Sistema de eco-localização. Até então só descrito para os Odontocetos (cetáceos com dentes). Costuma-se dizer que os Odontocetos "enxergam com os ouvidos". O complexo auditivo desses cetáceos não é

utilizado somente para que o animal ouça os sons provenientes do ambiente, mas também aqueles emitidos por eles mesmos no processo de operação de seu sonar ou eco-localização. Este sistema é o mesmo que o utilizado por morcegos e submarinos. A grande vantagem da utilização das ondas sonoras sob a água é que o som propaga-se quase cinco vezes mais rápido na água (1.500 m/seg) do que no ar (340m/seg), tornando o processo mais eficiente. Um fato bastante curioso está relacionado com a emissão dos sons pelos cetáceos.

Apesar de não possuírem cordas vocais como nós, eles emitem sons de baixa e de alta frequência, dependendo das circunstâncias, captáveis ou não ao ouvido humano, dependendo da frequência de emissão. No complexo nasal e em outras passagens de ar originadas no orifício respiratório há uma vibração de ar responsável pela emissão de sons, provocada por ação muscular das paredes.

3.1 – Mioglobina

Mioglobina (Mb) é uma proteína de cadeia grande, pigmento vermelho, com função similar à hemoglobina do sangue: leva o oxigênio para a célula muscular e armazena oxigênio até que seja necessário para a mitocôndria gerar ATP durante um exercício (Conley *et al* 1999, Tortora 2001).

O papel da mioglobina na função aeróbica é baseada na propriedade física de carregadora de oxigênio. Esse papel depende da entrega de O₂ pela mioglobina que, por sua vez, depende da pO₂ que resulta em: 1) armazenamento de oxigênio; 2) equilíbrio de pO₂ a fim de prevenir anóxia mitocondrial e 3) difusão facilitada de oxigênio.

A importância da mioglobina nas funções musculares é controversa, pois, tanto pode ser tida como pequena ou inexistente no que diz respeito à entrega de oxigênio, como pode também, ser demonstrada a relação entre a própria mioglobina e as funções aeróbicas (Conley *et al* 1999).

O primeiro passo para análise do papel da mioglobina é na difusão do suprimento de oxigênio. A difusão parece ser o caminho para o oxigênio ir

dos capilares às mitocôndrias e, sempre são requisitadas quando ocorre o limite da capacidade muscular (Godecke *et al* 1999).

A mioglobina é uma das proteínas mais concentradas na célula e em modelos assistidos, mostrou ser um grande mediador para o fluxo de oxigênio e mostrou ainda que a concentração de mioglobina é proporcional ao declínio de suprimento de O₂ e a chegada ao máximo da demanda do gás (Conley & Jones 1996). É uma forte candidata para complementação dos suprimentos de oxigênio porque possibilita um caminho paralelo para difusão na fibra muscular (Conley *et al* 1999).

4 - Metabolismo

As primeiras pesquisas sobre mamíferos mergulhadores focavam somente em como eles administravam as reservas de oxigênio e o substrato metabólico. Dados mostram que, na verdade, há uma redução por todo o metabolismo acoplado a um aumento relacionado com metabolismo aeróbico como indicação de depósito de ácido lático pós-mergulho.

A redução do metabolismo era indicada por uma profunda bradicardia associada a uma redução de efluxo cardíaco. Um estudo complementar de Costa (1999) mostrou que níveis de ácido lático que permanecem constantes por mergulhos durante mais de 20 minutos, rapidamente aumentam quando se dá o aumento da periodicidade do mergulho. Concluiu ainda que animais podem mergulhar por mais de 20 minutos quando usam metabolismo aeróbico. Desse estudo, pôde-se estipular o tempo máximo em que um animal pode permanecer submerso sem a utilização de caminhos metabólicos anaeróbicos como limite de mergulho aeróbico (ADL), que é calculado como $ADL \text{ (minutos)} = \frac{\text{total de O}_2 \text{ armazenado (ml de O}_2\text{)}}{\text{taxa metabólica do mergulho (mL de O}_2\text{/min}^{-1}\text{)}}$ (Kooyman 1983).

Então, sendo a maior quantidade de oxigênio armazenada o que determinará qual animal terá capacidade de permanecer maior tempo submerso, se comparado a outros animais, a baleia é a que possui maior

competência nesse sentido, demonstrando uma grande habilidade em armazenamento.

Avaliando a relação entre profundidade e taxa metabólica, é essencial descrever antes o que quer dizer espécies que vivem de mergulho. O critério usado por Somero (1990) para “profundo” é usado no contexto de capacidades metabólicas, diferentemente do que é o usado no contexto de adaptações para pressão. No primeiro contexto, refere-se a um acerto de dependência das condições ambientais existentes no subaquático, especialmente em relação à disponibilidade de luz e de alimento que, interagem ao selecionar as taxas apropriadas para atividade metabólica do organismo, ou seja, ganho energético com os suprimentos oferecidos na fauna e flora marinha.

As características biológicas e físicas dos animais que vivem perto da superfície e não aqueles que ficam geralmente em grandes profundidades, mas geralmente vêm até a superfície para se alimentar, podem agir como dominantes selecionando as propriedades de cada migrante. Por exemplo, migrantes verticais que chegam à superfície à noite encontram uma maior abundância de suprimentos do que em maiores profundidades. Prosser (1989) mostra que essa experiência de encontrar fontes de energia perto da superfície permite uma vida mais ativa do que a dos não-migrantes. Além disso, por causa da diferença entre as fontes energéticas presentes perto da superfície e em águas profundas, são os mergulhos rasos que algumas espécies costumam realizar que estabelecem melhor aproveitamento das funções metabólicas.

Um outro indicativo de adaptação é que quando uma baleia mergulha, sua tensão arterial diminui significativamente. O tempo que leva para alcançar tamanhos valores abissais de gás pode ser estendido a uma vasoconstrição periférica que, distribuirá a maioria do sangue oxigenado para o cérebro enquanto que, o resto do corpo tem que resistir com a quantidade de oxigênio existente no local e com metabolismo anaeróbico (Odden *et al* 1999).

Conclusão

A presente pesquisa analisou as adaptações de mamíferos para mergulhos em grandes profundidades e através da revisão bibliográfica realizada foi possível concluir que as adaptações cardiovasculares e respiratória são as mais importantes para o mergulho dos mamíferos, porque protegem o animal da pressão da água e aumenta o seu tempo de mergulho; os mamíferos aquáticos suportam mais as baixas concentrações de oxigênio, ao passo que resistem mais aos níveis elevados de CO₂.

Durante o mergulho, os mamíferos aquáticos contam com adaptações especializadas como a capacidade de economizar oxigênio, suportar gás carbônico, alterar sua circulação periférica e manter-la interna. Estas capacidades adaptativas possibilitam aos mamíferos mergulhadores a maior permanência submersos e o mergulho em profundidades maiores. As perspectivas em relação às descobertas sobre as adaptações fisiológicas dos animais são animadoras e possibilitou que a pesquisa em questão fosse possível.

Novos aparelhos de medição de funções estão possibilitando novas descobertas e conquistas de ambientes inóspitos, ou melhor não mais inalcançáveis. Através do estudo do mergulho dos mamíferos em grandes profundidades o homem hoje explora, através de robôs, por exemplo, as profundezas dos oceanos.

Referências Bibliográficas:

- CONLEY, K.E. & JONES, C. *Myoglobin content and oxygen diffusion: Model analysis of horse and steer muscle*. Process Natural Academy of Science, Estados Unidos, p.2027 - 2036.1996
- CONLEY, K. E., ORDWAY, G.A., RICHARDSON, R.S. *Deciphering the mysteries of myoglobin in striated muscle*. Scandinavian Physiological Society. Scandinavia, p.623 – 634. 1999
- COSTA, D.P. *The Role of Physiology in the behavior of diving mammals: insights from animals in nature*. University of California. Estados Unidos. 1999
- GODECKE, A. FLOGEL, U., ZANGER, K. *et al. Disruption of myoglobin in mice induces multiple compensatory mechanisms*. Process Natural Academy of Science, Estados Unidos, p. 10495 – 15000. 1999
- HARDING, C. *Going to Extremes*. National Wildlife, Aug/Sep 93, vol.31, item 5.
- HOCHACHKA, P.W., GUNGA, H.C. e KIRSCH K. *Our ancestral physiology phenotype: An adaptation for hypoxia tolerance and for endurance performance?.* Suiça, 1997
- KOOYMAN, G.L *Respiratory adaptations in marine mammals*. American Zoologist 13:457 – 468. 1983

- KOOYMAN, G.L. e SINNETT, E.E. *Pulmonary shunts in harbor seals and sea lions during simulated dives to depth*.
Physiological Zoology. 55: 105 – 111. 1982
- ODDEN, A., FOLKOW, L.P., CAPUTA, M., HOTVEDT, R. & BLIX, A.S. *Rapid Communication Brain Cooling in Diving Seals*. Acta Physiology Scand. 77-78pp. Polonia.1999
- PAULEV, P., *Descompression sickness following repeated breath-hold dives*. Journal of Applied Physiology 20:1028-1031.
- PORTILLA, N. *Fisiologia del medio interno*. México, p. 225 – 227. 1980.
- PROSSER, C.L. *Fisiologia Comparada*. 2ª ed. México, p. 117, 178 – 183, 187 – 201. 1989
- PROSSER.C.L. *Environmental and Metabolic Animal Physiology*. 4ª ed. Estados Unidos, p. 152 – 163. 1990
- PULEO, S. *Trapped in the depths*. American History, nº 10768866, Academic Serch Elite.Estados Unidos, Junho-2001.
- RUSHMER, R.F. *Cardiovascular Dynamics*. 2ª ed. Universidade da California, Estados Unidos, p.53 – 63, 193 – 195, 448 – 451. 1970
- SOMERO, G.N. *Hydrostatic Pressure and Adaptations to the Deep Sea*. 4ª ed. Estados Unidos, p. 167 – 199. 1990
- SOMERS, L.H., *National Grant Sea Library – Tradução de BELLOTI, J.2003*

THORNTON, S.J. *et al.* *Effects of forced diving on the spleen and hepatic sinus in northern elephant seal pups.* PNAS. Estados Unidos, 2001.

TORTORA, G.J. *Corpo Humano – Fundamentos de Anatomia e Fisiologia.* 4ª ed. Editora ArtMed, Rio de Janeiro, RJ, 2001, 19 – 23, 153 - 203, 321- 380, 406- 430 p.