

BLOCO 2

Documentos de Apoio

Anatomofisiologia



EXERCÍCIO FÍSICO

O estilo de vida do indivíduo deve incluir a prática do exercício físico. A sua falta pode favorecer:

- a degeneração do corpo (doenças cardiovasculares);
- o atrofiamento físico.

O exercício físico é o movimento corporal, realizado pelos músculos esqueléticos, com consumo de energia.

• Antes de começar o exercício físico,

Deves

- realizar um "aquecimento" (alguns minutos de caminhada e de corrida suave) e exercícios de alongamento muscular, para evitar problemas musculares e articulares, bem como perigos para o sistema cardiovascular;
- utilizar material desportivo adequado ao tipo de prática desportiva que se quer fazer;
- prestar atenção ao movimento atlético. Um exercício praticado de forma incorrecta pode originar problemas no aparelho musculo-esquelético;
- ter atenção à temperatura ambiente;
- evitar estar demasiado agasalhado.

Recomendação

- Antes de começares a fazer exercício físico, deves consultar um médico. As contra-indicações do exercício físico, na idade em que te encontras, são, no entanto, muito raras.
- Existem determinadas patologias, como a asma, os sopros cardíacos, as crises de epilepsia, a escoliose, que impõem algumas restrições. Por isso, deve ser o médico a tomar a decisão de aconselhar a prática deste ou daquele desporto.
- Na actividade desportiva existem riscos, mas maiores riscos correm os jovens quando são privados dela.



fig. 2 Exercício físico: canoagem (caiaque/lazer).

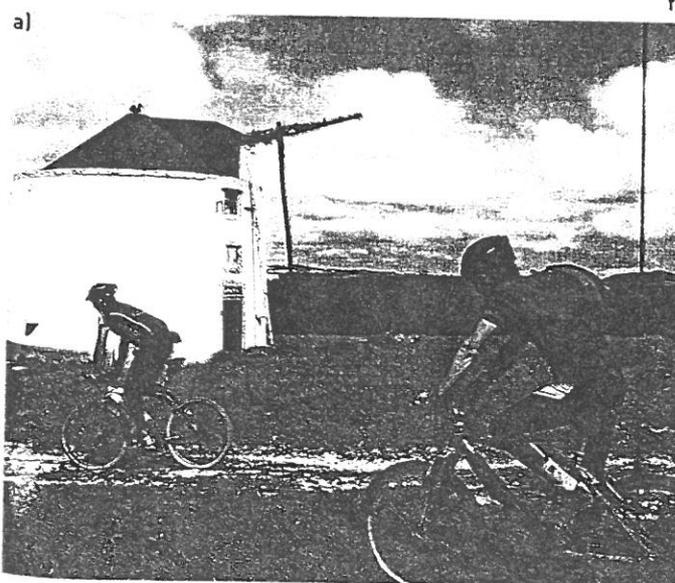
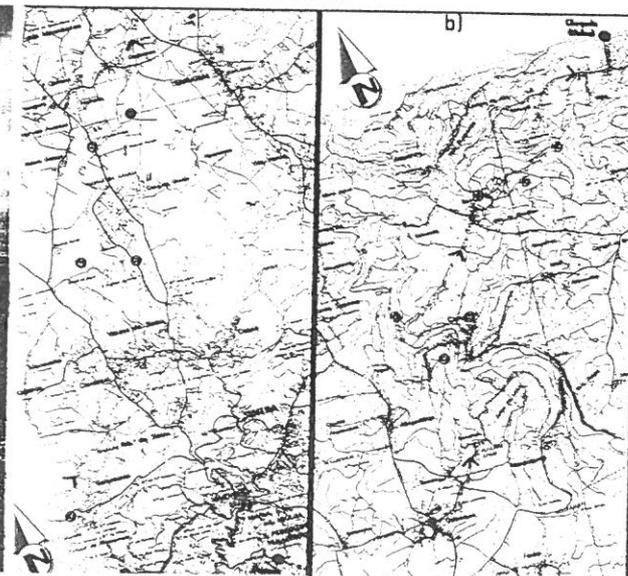


fig. 3 Exercício físico: BTT cultural.



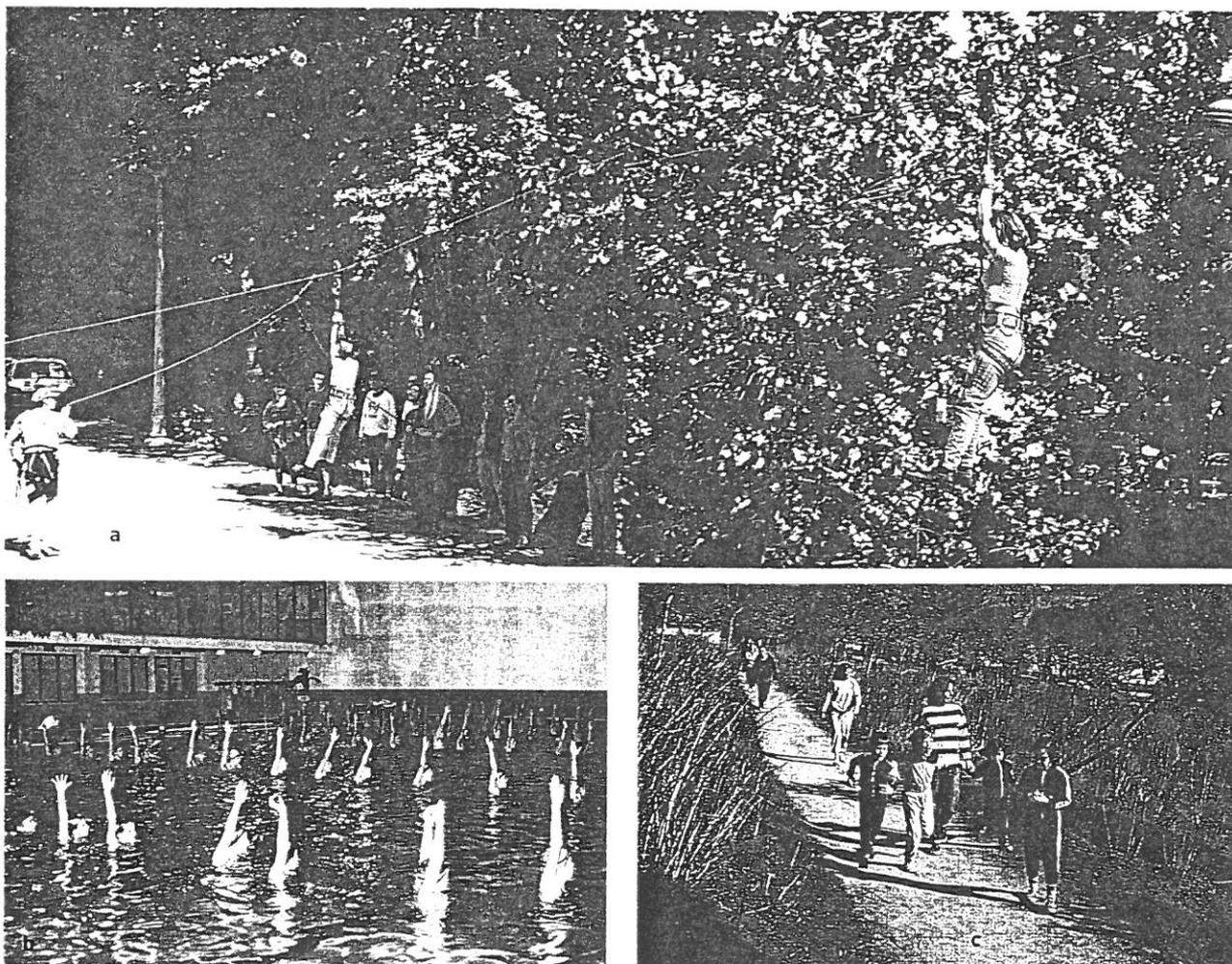


fig. 4 Exercício físico: a) "slide"; b) hidroginástica; c) caminhar.

• O exercício físico contribuirá para tornar o teu organismo, pouco a pouco, mais harmonioso:

– se for praticado regularmente

A frequência de três a quatro vezes por semana, com um mínimo de 30 minutos de esforço físico para cada sessão, é fundamental.

– se for praticado de forma progressiva

O esforço de cada sessão exige variações, isto é, as sessões devem ser ajustadas no tempo.

– se variar o tipo de sessão

O prazer de passar o tempo de forma agradável é a motivação fundamental.

– se aumentar gradualmente a intensidade do esforço, sem ultrapassar certos limites de ordem fisiológica e de tempo – capacidade do organismo.

Por exemplo, qual será a intensidade adequada para que se produza uma adaptação ao exercício físico aeróbio, numa pessoa não treinada com 45 anos de idade e que tenha 80 b.p.min em repouso?

1. A frequência máxima (F.C.M.) é de 220 menos a idade = $220 - 45 = 175$ b.p.min

2. A frequência cardíaca em repouso (F.C.R.), em pessoas não treinadas, oscila entre 55 e 100 b.p.min, dependendo do sexo, da idade, do estilo de vida, da estatura corporal.

3. O estímulo mínimo (E. Min.) deve ser de 40% e o estímulo máximo (E. Máx.) de 60% (21):

$$E. \text{ Min.} = (F.C.M. - F.C.R.) 40\% + F.C.R. = 120 \text{ b.p. min}$$

$$E. \text{ Máx.} = 140 \text{ b.p.min}$$

4. A intensidade adequada deve estar compreendida entre 120 e 140 b.p.min, a um ritmo respiratório 4.4 ou de quatro passadas.

fig. 5 com b 4 a 6 x) (3 x); cintur 14. ab

No impor da ter o aga: Os (pesso apres – pr média

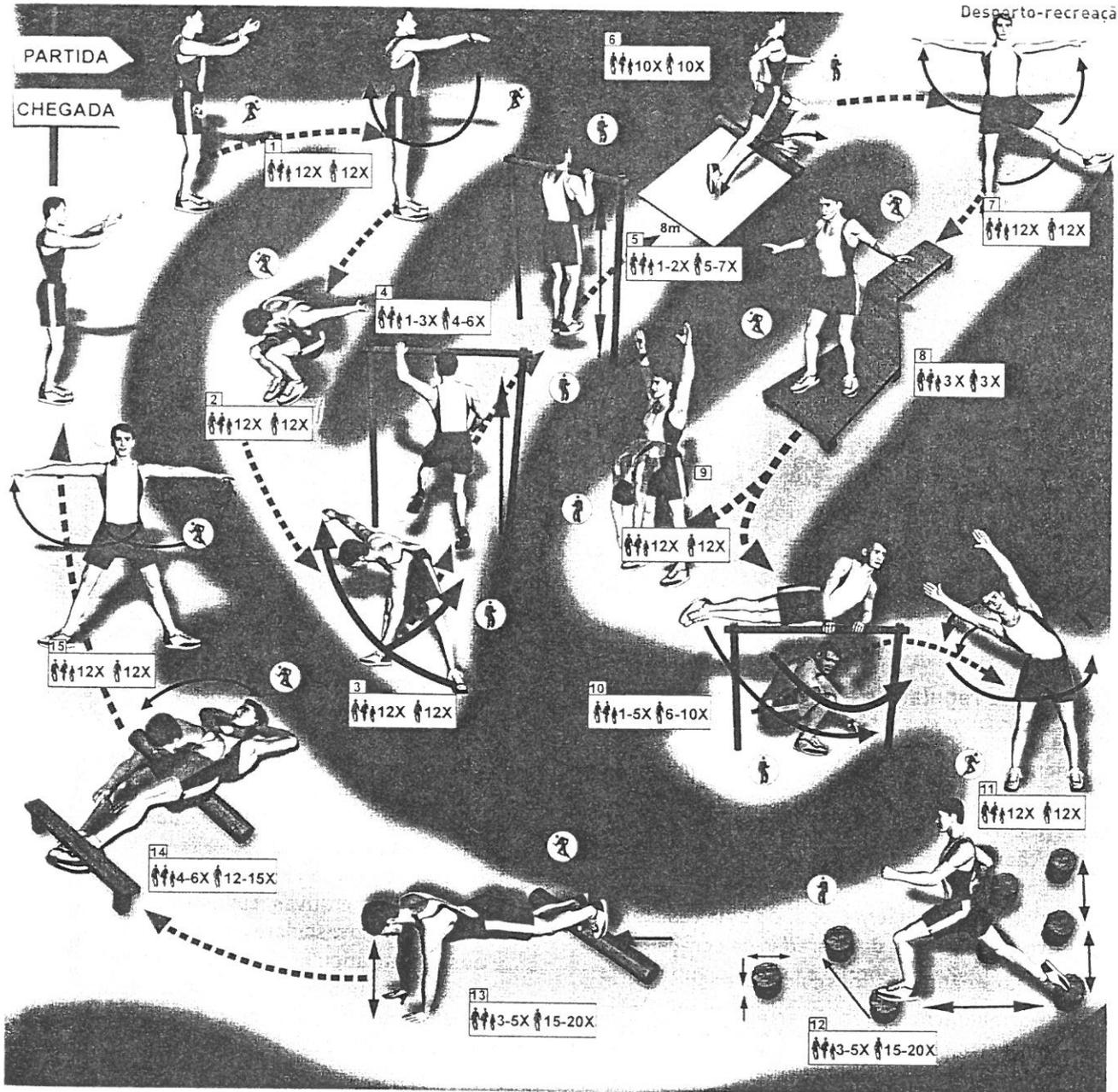


fig. 5 Exercício físico com percurso na Natureza [ciclo de manutenção]: 1. circundação de braços (12 x); 2. flexões de pernas com balanço dos braços (12 x); 3. torção do tronco (12 x); 4. saltar com uma ou com as duas pernas ao mesmo tempo (1 a 3 x - 4 a 6 x); 5. flexão e extensão dos braços (1 a 2 x - 5 a 7 x); 6. saltar alternadamente (10 x); 7. balanço lateral (12 x); 8. equilíbrio (3 x); 9. elevação e flexão do tronco (12 x); 10. saltar e passar por baixo da barra (1 a 5 x - 6 a 10 x); 11. circundação da cintura/braços (12 x); 12. equilíbrio em corrida (3 a 5 x - 15 a 20 x); 13. flexão e extensão dos braços (3 a 5 x - 15 a 20 x); 14. abdominais (4 a 6 x - 12 a 15 x); 15. circundação frontal cruzada dos braços (12 x).

No início e no final de qualquer exercício físico, é importante o controlo cardíaco e, se possível, a medição da tensão arterial. É também importante ter em atenção o agasalho e o banho no final do exercício.

Os circuitos de manutenção estão ajustados para pessoas de todas as idades e de ambos os sexos, apresentando como objectivos:

- proporcionar uma prática desportiva de fraca e de média intensidade;

- desenvolver de forma harmoniosa todo o corpo.

Em cada "estação" deve existir uma placa, quer para indicar o número de repetições - manutenção/família (👤👤👤), quer para indicar como se faz a mudança de uma "estação" para a outra - marcha (🚶); ou corrida (🏃); o ritmo depende do relevo do percurso e do exercício entre cada "estação"; no entanto, as distâncias devem ser idênticas.



fig. 6 Exercício físico: ginástica aeróbica.

• A prática regular de exercício físico auxilia:

- a circulação sanguínea pelo músculo, aumentando entre quatro e dez vezes o volume sanguíneo: a contracção muscular permite uma abertura ao máximo dos vasos sanguíneos e reduz a formação das placas que provocam os ataques cardíacos. Sem exercício físico regular, a circulação do sangue fica mais lenta, opondo uma resistência passiva à contracção das paredes do coração;
- o relaxamento dos músculos tensos;
- a normalização da tensão arterial;
- ao fim de algumas semanas, no organismo de uma pessoa sedentária, a diminuição da frequência cardíaca (bradicardia) em estado de repouso e o regresso ao estado normal com mais facilidade, depois do exercício físico;
- a libertação da agressividade, quer física, quer emocional;
- o controlo do peso, mantendo o corpo harmonioso e atraente, fazendo o desgaste da energia proporcionada pelos alimentos que consome. O mesmo não acontece com quem não tem uma actividade física regular.

Recomendação

- O exercício físico, com uma participação predominante do esforço de tipo aeróbio, proporciona uma melhoria da qualidade de vida. Por consequência, é um factor decisivo para a saúde (acção preventiva de algumas doenças degenerativas, em especial das doenças cardiovasculares, relativas ao coração e aos vasos sanguíneos). Esta actividade é considerada uma protecção forte, um amigo fiel, isto é, um medicamento de vida para quem o pratica (22).

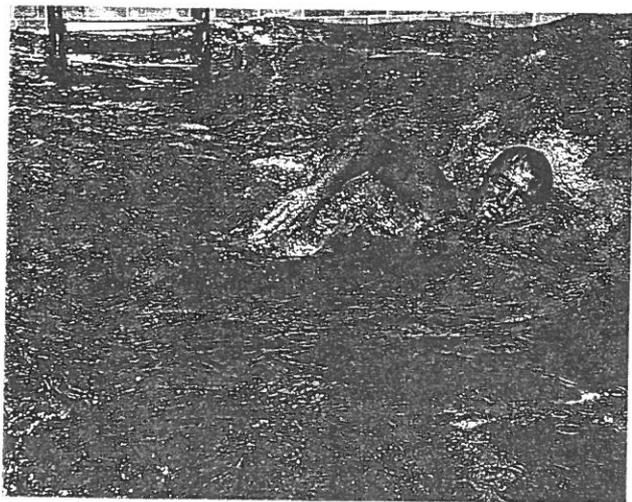


fig. 7 Exercício físico: nadar.



fig. 8 E 30", 25" marcha com um pausa d

- a e;
ligame
postura
vantage
- os r
memór
cérebro
imagina
de quiló

PAULO



fig. 9

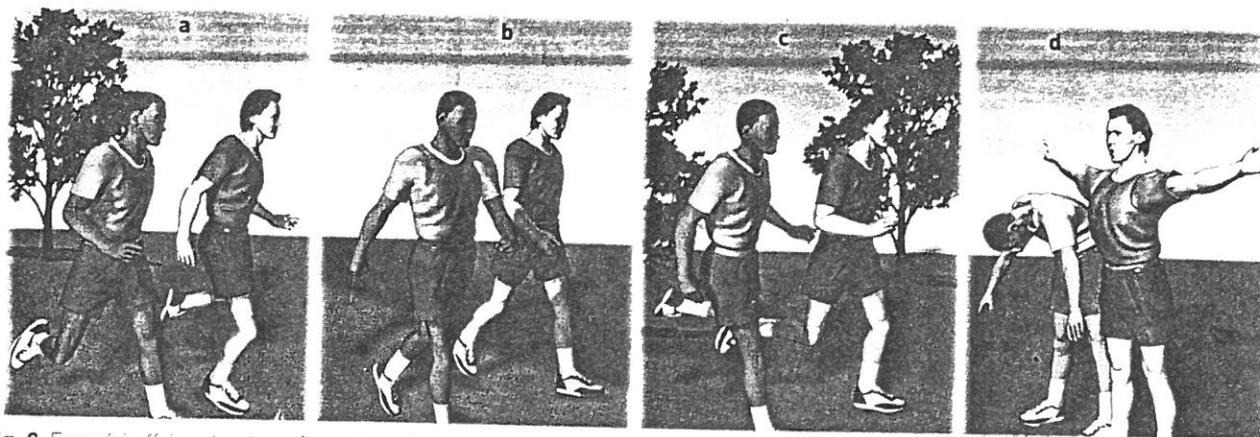


fig. 8 Exercício físico: jogging. a) corrida; b) pausa; c) corrida; d) recuperação activa. Sistema de pirâmide, 10", 15", 20", 25", 30", 25", 20", 15" e 10" de corrida com pausas iguais em marcha (duas séries com um intervalo de 3' em recuperação activa - marcha e exercício de descontração) ou 15", 30", 45", 60", 45", 30" e 15" de corrida com pausas iguais em marcha (duas séries com um intervalo de 3 a 4 minutos, em recuperação activa). Organização intervalada de jogging, 10 x 100 m em 35" a 40", com pausa de 1' e 30" em marcha; 8 x 200 m em 80" com pausa de 2', em marcha; 6 x 300 m em 2', com pausa de 2' e 30" em marcha.

- a exercitação dos músculos, tendões e ligamentos vertebrais, possibilitando uma melhor postura corporal, advindo deste facto consideráveis vantagens para a coluna vertebral;

- os neurónios a serem mais activos. Também a memória é melhorada, por serem fornecidos ao cérebro glicose e oxigénio, fonte de estímulo para a imaginação. A imaginação aumenta com o número de quilómetros percorridos.

Tema Debate

Observa a figura 9. O Paulo faz exercício físico três a quatro vezes por semana. O Sérgio nem sempre faz exercício físico, no entanto, foi convidado pelo Paulo para o acompanhar numa sessão de corrida de resistência de longa duração de 20 minutos.

1. Quem teve uma frequência cardíaca mais elevada? Justifica.
2. Será que a estatura corporal do Sérgio ou o seu estilo de vida tem alguma influência na realização do exercício físico? Justifica a tua resposta.



fig. 9



REPOUSO

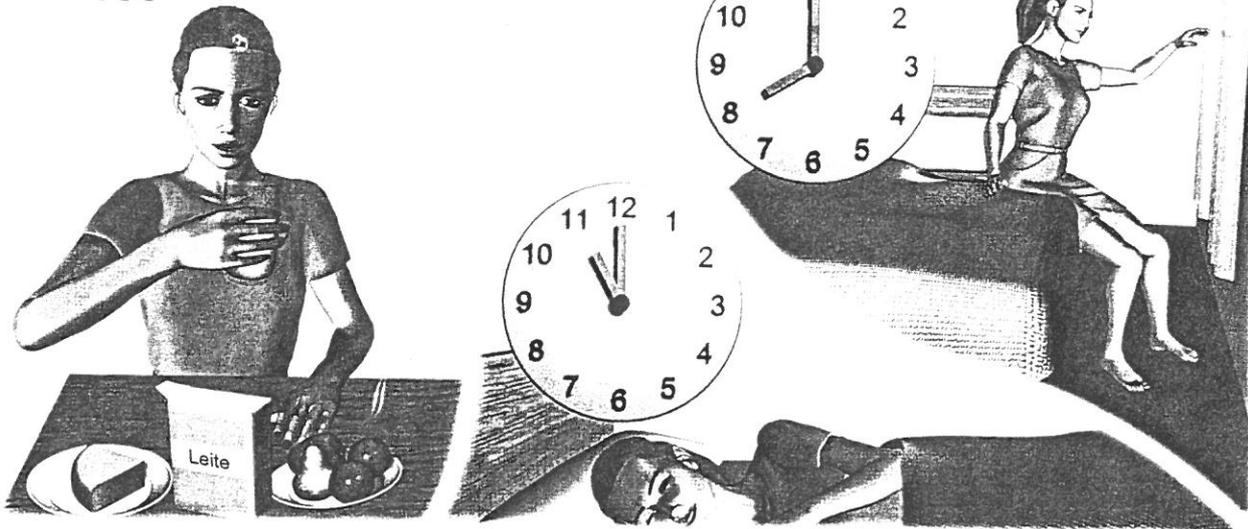


fig. 10

O exercício físico intenso e regular, sem um adequado repouso, provoca no organismo:

- mal-estar;
- perda de rendimento.

Estes sintomas podem ser caracterizados por perturbações do sono, perda de apetite, irritação e, por vezes, são também causa de acidentes e lesões.

No entanto, para obteres um adequado benefício da prática desportiva,

Deves

- realizar o exercício físico de forma regular e continuada;
- respeitar o tempo de repouso. A sua importância reside no tempo de recuperação, para que seja restituída ao organismo a energia necessária. Por isso, durante a recuperação, uma alimentação equilibrada é um factor importante, tal como o descanso, através do sono de oito a nove horas.

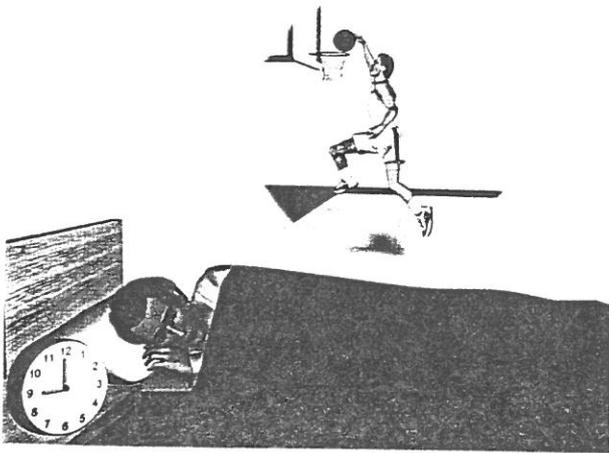


fig. 11

Recomendação

- O consumo de tabaco prejudica a regular prática desportiva e, em geral, a saúde. O fumo do tabaco contém um gás tóxico (monóxido de carbono) que se fixa nos pulmões, fazendo com que as células recebam menor quantidade de oxigénio.
- O consumo de bebidas alcoólicas tem efeitos nocivos no organismo, em especial no cérebro, no fígado e no estômago; estes órgãos são importantes no trabalho muscular.
- Deitar muito cedo também tem os seus inconvenientes. Antes de uma competição importante, deve manter-se a hora normal ou deitar-se só quando se tiver sono. Não o fazendo, geralmente, não se conseguirá dormir e só se pensará na competição (fig. 11). Também não se deve levantar muito para além da hora habitual, pois podemos alterar o nosso relógio biológico e sentirmo-nos ainda mais fatigados. Este facto deve-se, em parte, à libertação de cortisol pelo corpo (hormona associada ao estado de alerta) que, para quem se levanta às 7 horas, tem o seu início entre as 3 e as 4 horas e atinge o seu ponto alto às 11 horas. Quando ficamos na cama para além desta hora, estamos a suprimir o nível de cortisol e, conseqüentemente, mergulhamos o nosso cérebro numa semi-inércia (23).

Pa
ener
nutr
quím
A p
roda
refei
quali
são t

D

- ter
- ter
- ino
- me
- fa;
- vic
- inc
- co
- nã
- jej
- ma
- do

fig. 12
Grupc
Grupc
Grupc
Grupc

Os a
energ
neces
carbor
miner



Para que um músculo se contraia, é necessário energia. Ora, é o sangue que transporta os nutrientes e o oxigénio para transformar a energia química dos alimentos em energia muscular.

A proporção dos constituintes da alimentação – **roda dos alimentos** –, bem como o horário das refeições são princípios fundamentais para uma boa qualidade de vida. Os cuidados com a alimentação são também fundamentais.

Deves

- ter uma alimentação variada;
- ter refeições bem repartidas, ao longo do dia;
- incluir sempre na dieta alimentar certos alimentos fundamentais;
- fazer a digestão, antes de iniciar qualquer actividade desportiva, para não aparecerem as indisposições; assim, é importante aquilo que comemos à hora da refeição;
- não fazer exercício físico pela manhã, em jejum. O pequeno-almoço permite passar uma manhã sem fadiga e constitui um suplemento do conforto psicológico (fig. 13).

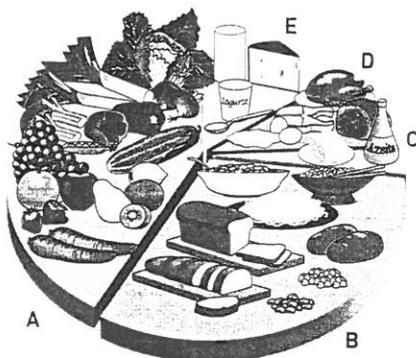


fig. 12 Roda dos alimentos

Grupo A – Fundamental na nossa alimentação diária (legumes e fruta).

Grupo B – Rico em hidratos de carbono, principal fonte de energia (cereais).

Grupo C – Azeite, manteiga.

Grupo D – Carne, peixe e ovos.

Grupo E – Leite, queijo e iogurte – importante na alimentação diária.

Os alimentos são utilizados para fornecerem a energia indispensável ao metabolismo. São necessários alimentos ricos em hidratos de carbono, gorduras, proteínas, água, vitaminas e sais minerais, isto é, aquilo de que somos constituídos.

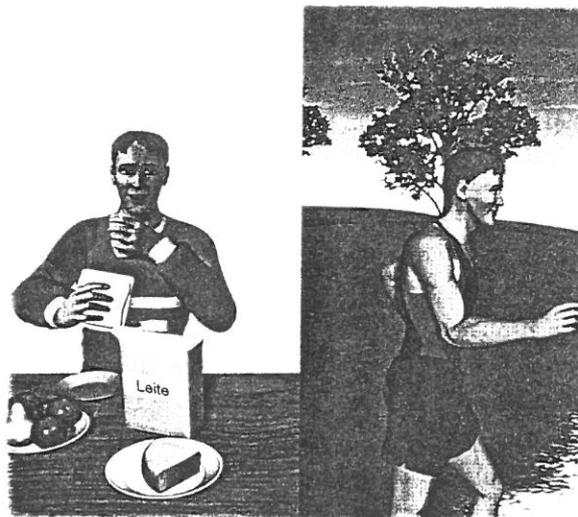


fig. 13

Tema | Debate

Observa a figura 14. É uma situação que merece alguma reflexão:

1. Será que respeitou o tempo de digestão?
2. Se o jogo fosse realizado pela manhã, qual seria a provável causa desta situação?



fig. 14

Desporto rendimento

Não pode haver vida sem um fluxo contínuo de matéria viva, energia e informação, sendo esta última privilégio dos seres vivos. Toda a informação genética do indivíduo está no seu ADN (ácido desoxirribonucleico).

O genótipo é o conjunto de caracteres hereditários de cada indivíduo. O fenótipo, por sua vez, resulta da interacção das características hereditárias de cada indivíduo e do meio em que este se insere.

A totalidade das capacidades do ser humano não estão implícitas nele, embora muitas das suas possibilidades tenham a ver com aquilo com que se nasce, ou seja, a hereditariedade coloca um limite a essas capacidades. Assim, um ser humano, ao nascer, pode possuir, por exemplo, uma determinada força, mas não uma habilidade motora (técnica desportiva) para jogar andebol ou voleibol. Só os factores de ordem exógena ou do meio ambiente podem influenciar o desenvolvimento dessas potencialidades, dando origem à caracterização individual de um organismo num todo (fig. 1).

O desporto de rendimento é caracterizado pela *performance* e pela ambição de recorde. O treino diário de muitas horas é o pré-requisito fundamental para materializar o rendimento em competição.

Para a continuidade de melhores *performances*, o sistema desportivo recorre à cultura de talentos, sua descoberta e promoção. A profissionalização dos atletas, para além dos salários e dos prémios, passa também pelos contratos com patrocinadores, que gerem os espectáculos desportivos.

Devido à pressão dos espectadores e dos órgãos de comunicação social, o desporto transformou-se em trabalho, colocando em risco a liberdade pessoal do atleta.

Competências específicas

- Saber o objectivo do treino (9.º ano).
- Conhecer os tipos de treino e seus objectivos.
- Saber diferenciar o estado de condição da forma desportiva.
- Saber identificar as funções das leis biológicas do treino.
- Compreender a dinâmica da carga funcional ("esforço").
- Saber as consequências do treino intensivo precoce no jovem atleta.
- Saber as alterações orgânicas provocadas pelo treino.



fig. 1 Fernanda Ribeiro, campeã olímpica dos 10 000 m, em Atlanta, 1996. Dotada geneticamente, soube tirar partido dessa qualidade, para se desenvolver através de um treino individualizado correcto.

TREIN

A vida finalizada e externa

A adaptação - estímulo - treino

Mas, e rendimento de treino por resistência

O treino de condição quantitativa possível

Para um considerado organismo com a finalidade de rendimento

- Treino Deve-se e progressivamente através da muscular resistência

- Treino técnica in e precisão imprescindível específico física, que rigor as se efeito esp desenvolvimento físicas esp isoladamente

Na gran preciso de de capacidade -se o morf conjugação que possibilita resultados

Durante outro despo está em óptima condição física



TREINO

A vida é um somatório de adaptações, que têm por finalidade resistir às mudanças ambientais, internas e externas, criando-se equilíbrios com o meio.

A **adaptação** pode ser caracterizada por:

- estímulos novos de vida;
- treino.

Mas, enquanto no primeiro caso o nível de rendimento é muito baixo e a resistência normal, o treino procura padrões de rendimento e de resistência elevados.

O treino visa o aumento da resistência às condições do ambiente – mais rendimento, quer quantitativo quer qualitativo, com a menor fadiga possível e maior resistência.

Para uma abordagem adequada, devem considerar-se todos os aspectos funcionais do organismo, físicos, técnicos, tácticos ou psíquicos, com a finalidade de se conseguir o máximo de rendimento com o mínimo de esforço.

- **Treino geral:** tem por objectivo a formação geral. Deve-se entendê-lo como o fortalecimento progressivo e harmonioso da capacidade física, através da adaptação das funções orgânicas e musculares, tendo em vista um padrão elevado de resistência ao trabalho (fig. 2).

- **Treino específico:** tem por objectivo a eficácia da técnica individual em cada desporto, como a rapidez e precisão, mediante a utilização dos músculos imprescindíveis ao movimento. É através do treino específico que se desenvolve a adaptação quer física, quer psíquica do praticante, para cumprir com rigor as solicitações da competição. Como tem efeito específico no organismo, não se devem desenvolver simultaneamente várias qualidades físicas específicas; cada uma terá de ser treinada isoladamente (fig. 3).

Na grande maioria das actividades desportivas, é preciso desenvolver simultaneamente um conjunto de capacidades; devido a este facto, deve encontrar-se o momento de forma desportiva, pela conjugação do treino geral com o treino específico, que possibilita ao praticante obter óptimos resultados em competição.

Durante um encontro de futebol, ou qualquer outro desporto, é frequente afirmar-se que o atleta Y está em óptima forma ou que o atleta X está em boa condição física.



fig. 2

O **estado de condição** atinge-se quando o atleta se encontra em óptimo equilíbrio fisiológico para a prática de determinada actividade desportiva. Por exemplo, um jogador de andebol, de basquetebol ou de futebol, após um jogo bem disputado, não apresenta sinais de fadiga.

Nos desportos colectivos, este é o estado que mais interessa manter, pelo facto de o atleta ter de responder ao esforço durante um longo período de tempo.

A **forma** é o apogeu do rendimento do atleta numa determinada actividade desportiva. É considerada durante um período mais ou menos duradouro da actividade de um atleta, variável e, em grande parte, só identificada através dos resultados obtidos durante as competições.

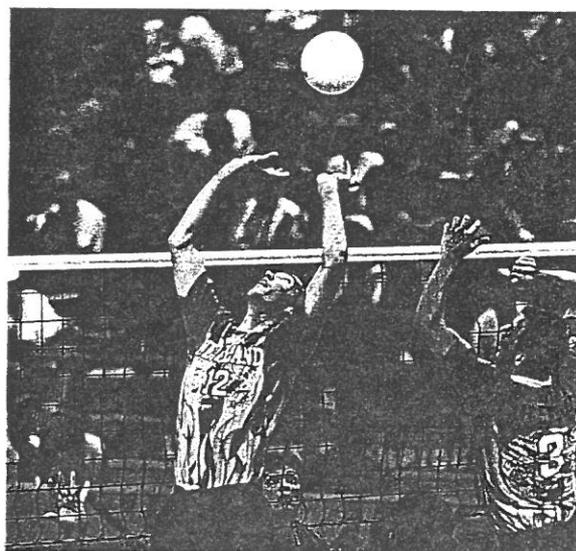


fig. 3



LEIS BIOLÓGICAS DE TREINO

Cada ser humano apresenta um limite próprio de capacidade de treino, não devendo ultrapassá-lo, pois corre o risco de entrar em desequilíbrio patológico. Esse limite varia de indivíduo para indivíduo e depende de inúmeros factores:

- nível biológico actual;
- potencialidades motoras, psíquicas;
- profissão, idade, sexo, raça, constituição física, hereditariedade;
- ambiente em que vive;
- regime de vida e de alimentação.

1. Lei da sobrecarga

A carga funcional (esforço) deve ser de valor aproximado ao nível pretendido, em relação a cada praticante num determinado momento, para se efectuarem sucessivas adaptações no organismo (fig. 5).

Por isso, é necessário que haja uma progressão adequada:

- no aumento do volume;
- na duração de cada sessão de trabalho;
- na sua intensidade ou mesmo no aumento da percentagem da capacidade máxima.

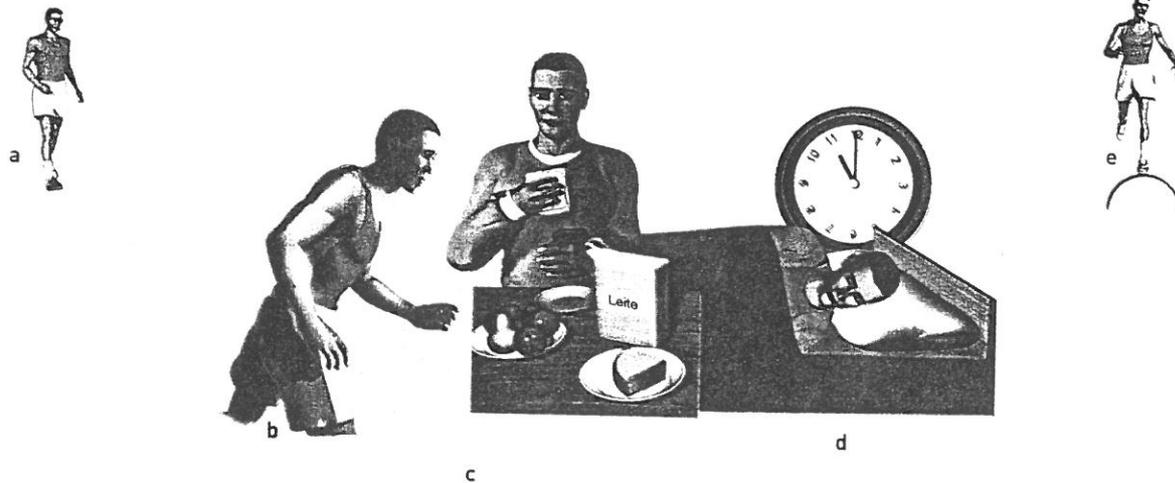


fig. 4 Carga funcional (esforço): **a)** nível inicial de capacidade; **b)** carga/treino (todas as acções - estímulos executados em espaço de tempo determinado). Os estímulos podem ser muito diversos e de intensidade distinta, originando transformações - adaptações - morfológicas e funcionais do organismo; **c)** estado de fadiga (capacidades diminuídas); **d)** repouso; **e)** estado superior de capacidades, denominado de exaltação ou supercompensação [24].

O treino provoca no organismo excitação, que conduz a um desgaste da estrutura celular, dos tecidos e das reservas energéticas, originando o estado de fadiga (capacidades diminuídas). O repouso possibilita a reconstrução celular, que é feita através de processos bioquímicos, pela acção conjugada da alimentação e do aumento da absorção de oxigénio; as substâncias energéticas da célula (como o ATP - trifosfato de adenosina - e a PC - fosfato de creatina e glicogénio) são armazenadas a partir da combustão dos alimentos (hidratos de carbono, lípidos, proteínas), atingindo-se um estado superior de capacidade. Este estado manifesta-se num aumento das capacidades e numa melhor organização estrutural (locomotora, orgânica e nervosa), isto é, o homem aperfeiçoa-se devido aos mecanismos de **auto-regeneração** - manifestação fundamental de tudo o que é vivo - que se verifica graças às possibilidades que o ser vivo tem de entrar em trocas metabólicas com o meio ambiente, recebendo assim elementos que vêm do exterior. Se o tempo de regeneração não for suficiente, estaremos a regredir, "supertreino". O treino deve ser iniciado na parte alta da supercompensação.

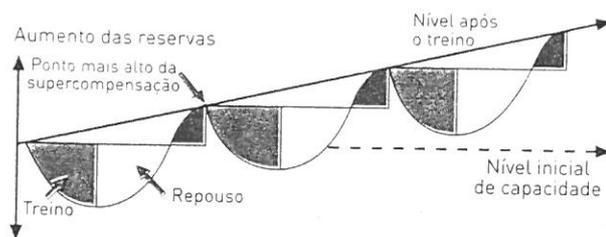


fig. 5 Evolução positiva do treino.

No trabalho físico, é essencial alternar o **volume** (quantidade) e a **intensidade** (qualidade). Esta alternância deve ser entendida para a realização das cargas de treino, como:

- grande quantidade, para fraca intensidade;
- pequena quantidade, para forte intensidade.

A sequência do trabalho físico, através de cargas repetidas regularmente, bem como o seu aumento gradual, pode implicar a sua maior ou menor **duração**.

As cargas de treino, para surtirem efeito, devem ser orientadas tendo em conta o seguinte: **ao trabalho forte, deve seguir-se o trabalho médio ou fraco e vice-versa.**

fig. 6
prati
não p

O
evita
card
parti
outra



Ap
un
se
1.

2.

3.

BEE
FUMEI
NÃO F
UMA
P



fig. 7

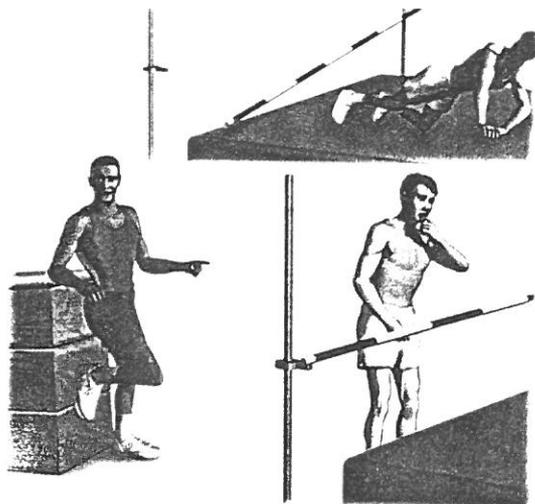


fig. 6 Uma determinada carga pode ser demasiada para um praticante e representar um fraco estímulo para outro, isto é, não produzir adaptação.

O aumento da carga deve ser gradual, para se evitarem danos irreversíveis no sistema cardiovascular e outros. Por isso, deve iniciar-se partindo de atitudes simples, fáceis e conhecidas para outras mais complexas, mais difíceis e desconhecidas.

Tema | Debate

Após o treino, três amigos foram conviver para um bar. Observa a figura 7 e responde às seguintes questões:

1. Com um regime de vida do género apresentado, será possível atingir a forma desportiva? Porquê?
2. Quais serão as consequências para os três amigos se, ao fim de alguns dias, continuarem com este regime de vida e a ter uma prática desportiva regular?
3. Que cuidados devem ter para melhorar o seu rendimento, quer desportivo quer escolar?



fig. 7

Caracterização da carga

Para acontecerem as alterações orgânicas, é preciso uma determinada qualidade e quantidade de estímulos fortes.

- Intensidade demasiado fraca - perda de capacidades.
- Intensidade média - mantém as capacidades.
- Intensidade forte - melhoria estrutural e funcional do organismo; funciona como estímulo correcto de treino.
- Intensidade demasiado forte - provoca o esgotamento ou a exaustão.

Para que aconteça uma melhoria crescente das capacidades, é necessário ter sempre presente a **alternância** do tipo de trabalho e intensidade a realizar para grupos musculares diferentes.

A **continuidade** do treino é importante para o desenvolvimento das capacidades dos atletas, pois sem paragens é que se pode:

- alcançar os objectivos preestabelecidos;
- assegurar o processo de adaptação.

Para se atingir um elevado rendimento desportivo não pode haver quebra de trabalho, pois esta origina uma diminuição do nível das capacidades.

Tema | Debate

Observa a figura 8. É importante fazer uma reflexão cuidada.

1. Será que a atitude do Manuel João é positiva? Justifica.
2. Será que o Manuel João vai manter as suas capacidades? Justifica.



fig. 8



ALTERAÇÕES ORGÂNICAS DO TREINO

Para o organismo, as mudanças biológicas após o esforço são fundamentais, o que favorece e lhe possibilita sucessivas adaptações.

1. Sistema muscular

Com a actividade desportiva regular, o músculo esquelético engrossa – **hipertrofia**, isto é, dá-se uma dilatação de cada fibra muscular ou célula que o compõe (fig. 14). Também é possível o aumento do número de fibras na divisão longitudinal de cada músculo – **hiperplasia** [25].

Por consequência, há:

– um maior armazenamento de glicogénio, fosfocreatina e ATP, assim como um maior consumo de oxigénio;

– um aumento do poder e da resistência de contracção, pelo facto de o músculo ser mais sensível aos impulsos nervosos e mais rápido na resposta à ordem da vontade. O poder é obtido pela acumulação da reserva de energia no fígado;

– ao mesmo tempo, os músculos são educados para uma economia de movimentos, tornam-se duros e elásticos, desaparecendo as substâncias adiposas (gorduras) acumuladas.

2. Sistema ósseo

A densidade óssea, em termos globais, é maior nas pessoas que têm uma actividade desportiva regular, do que nas pessoas sedentárias [26].



fig. 14

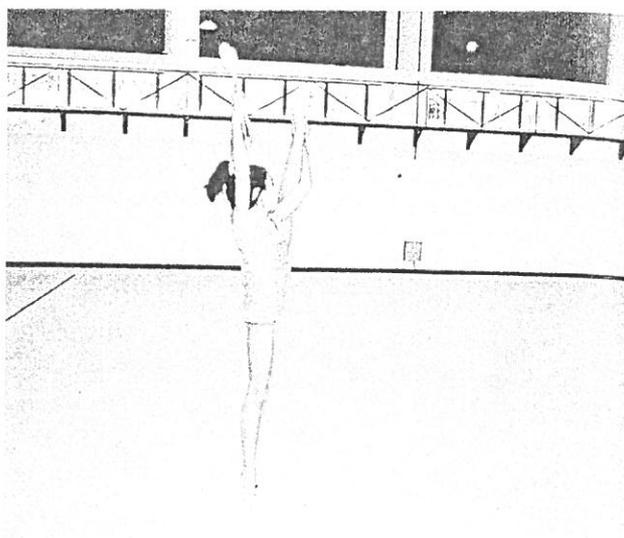


fig. 15

3. Sistema cardiocirculatório

Através da actividade desportiva regular, o sangue chega em maior quantidade aos músculos, originando uma maior rede capilar, o que possibilita maiores trocas de oxigénio e dióxido de carbono. Também reduz o colesterol prejudicial no sangue, ao mesmo tempo que aumenta o colesterol bom; este tem um papel de estabilização e entra no metabolismo. Por isso, a interrupção frequente da actividade deve ser alvo de reflexão.

O coração adapta-se ao esforço, começando pelo aumento das suas paredes – hipertrofia; este engrossamento eleva a sua força de contracção e, por consequência, é maior a quantidade de sangue em todas as partes do corpo. Depois, dilata-se, isto é, torna-se maior o volume de sangue que pode armazenar, permitindo-lhe aumentar a onda cardíaca e, por efeito desta, a diminuição do número de sístoles, podendo chegar às 40 pulsações por minuto – bradicardia.

As suas vantagens são muito importantes para o homem:

- reduz o trabalho do coração;
- aumenta no coração o período de repouso entre as sístoles;
- permite uma certa margem de aceleração;
- obtém-se uma recuperação mais rápida.

A pressão arterial aumenta com o esforço e tem por objectivo facilitar a circulação sanguínea nos músculos, durante o esforço.

fig. 16
adulto;

Por i
de a ac
dilataç
A act
regres
ao cora
uma re

4. Sis

As su
depend
oxigénio
Após
respirat
atingir
ofegant
respiraç

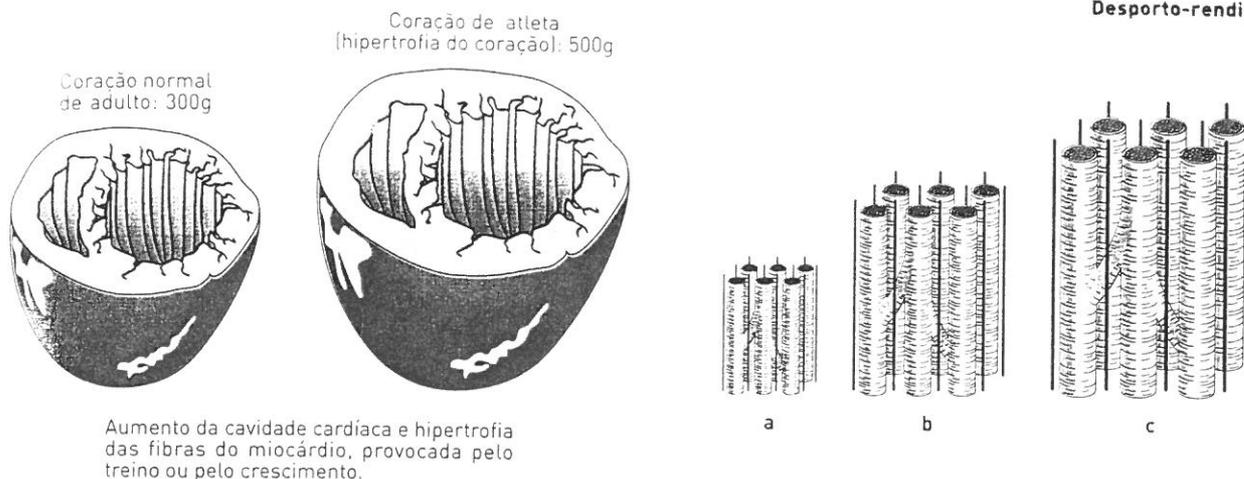


fig. 16 Fibras do miocárdio com a sua rede capilar durante o desenvolvimento: a) coração de criança; b) coração normal de adulto; c) coração do atleta (27).

Por isso, a vascularização é melhorada pelo facto de a actividade desportiva proporcionar uma dilatação dos vasos sanguíneos.

A actividade desportiva possibilita também o regresso do sangue venoso, em melhores condições, ao coração; o impacto do pé de apoio no solo origina uma reacção que impele o sangue para cima.

4. Sistema respiratório

As suas alterações estão intimamente ligadas e dependentes da necessidade de transporte de oxigénio, através da circulação sanguínea.

Após a sua adaptação, partindo de ciclos respiratórios baixos, tem um maior tempo para atingir o "sofrimento taquipneico" (respiração ofegante) ou sufocação, isto é, dificuldades de respiração ao nível da expiração, passando, assim,

ao ritmo respiratório 2.2 ou 2 passadas: duas para a inspiração e duas para a expiração, durante todo o esforço, havendo uma economia de energia.

A actividade desportiva favorece a abertura de todos os alvéolos pulmonares, aumentando a amplitude torácica, o que permite inspirar uma maior quantidade de ar – grande capacidade respiratória.

Facilita igualmente o afluxo de sangue rico em oxigénio e o trabalho cardíaco, devido à dilatação.

5. Sistema nervoso central

O essencial não é o aumento da capacidade de trabalho, mas sim tornar esse trabalho eficiente pelo aperfeiçoamento técnico, tendo em vista a função essencial que é a repetição do mesmo exercício.

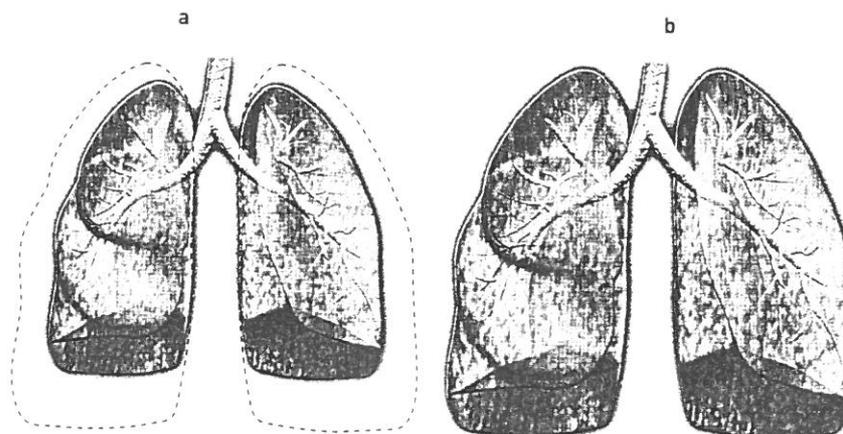


fig. 17 Volume do pulmão na respiração: a) pulmão sem treino; b) pulmão com treino (28).

universidade técnica de lisboa
FACULDADE DE MOTRICIDADE HUMANA

anatomofisiologia

TOMO II

Função Neuromuscular

Editor
PEDRO PEZARAT CORREIA

f **MH** edições

Ciências da Motricidade

Editor: Pedro Pizarat Correia

ANATOMOFISIOLOGIA - Tomo II

Edições FMH

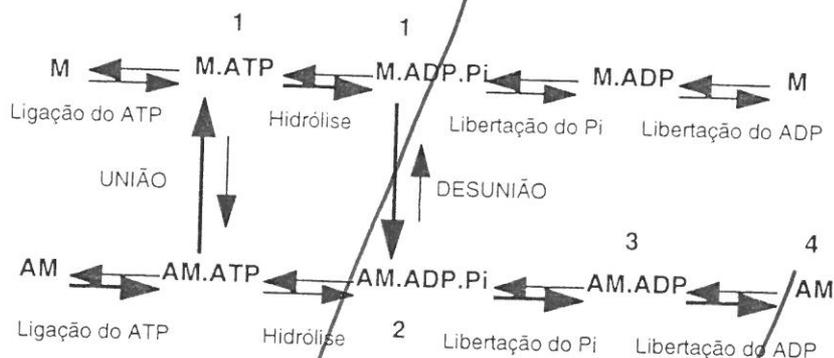


Figura 6.7 - Esquema simplificado das várias reacções do ciclo de actomiosina. M representa a miosina ou a porção S_2 e A representa a actina. O sentido principal das reacções está representado pelas setas mais carregadas. Os números indicam as fases descritas no texto.

é relativamente reduzido. Em contracções isométricas as várias estimativas indicam que este número se situa em torno dos 25%.

6.3.4 Relaxamento muscular

O relaxamento muscular depende da recaptação do cálcio de novo para o interior do lúmen do retículo sarcoplasmático. O aumento da concentração de cálcio livre no citosol desencadeia a actividade da proteína presente na membrana do retículo sarcoplasmático que faz o transporte activo de cálcio para o interior daquele organelo, com utilização da energia obtida pela hidrólise do ATP. Esta bomba do cálcio, designada de Ca^{2+} -ATPase, transporta dois iões por cada molécula de ATP hidrolisada. O processo de relaxamento muscular é um processo que decorre activamente e que consome energia. As actividades das bombas do cálcio da membrana do retículo sarcoplasmático e do sódio e potássio do sarcolema, são responsáveis pelo consumo de cerca de um terço do consumo total de ATP durante a contracção muscular.

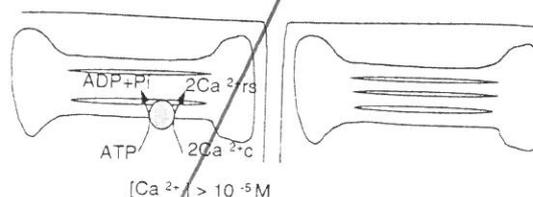


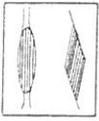
Figura 6.8 - Triade muscular, com representação da bomba do cálcio da membrana do retículo sarcoplasmático. O valor de 10^{-5}M diz respeito ao valor da concentração do cálcio livre no citosol a partir do qual é desencadeado o processo de contracção muscular e que, simultaneamente, activa a bomba do cálcio.

segundos, ao fim dos quais as reservas se esgotam. Contudo, sabe-se que a concentração de ATP no interior da fibra muscular sofre apenas uma ligeira redução durante a contracção muscular, mesmo quando as contracções são intensas e quando há fadiga muscular instalada. Estas observações mostram que o músculo esquelético possui um metabolismo energético capaz de aumentar rapidamente a síntese de ATP de modo a equilibrar o seu consumo durante a actividade muscular. A importância e a eficiência das fontes musculares de ressíntese de ATP ficam demonstradas se atendermos que a demanda desta molécula aumenta entre 500 e 700 vezes durante a realização de exercício intenso.

A actividade muscular caracteriza-se por grande variação na intensidade e duração das contracções. Os músculos podem contrair-se

6.4 FONTES ENERGÉTICAS DA CONTRACÇÃO MUSCULAR

A quantidade de ATP armazenada na fibra muscular é relativamente baixa (25 mmol. Kg^{-1} de peso seco) e apenas suficiente para manter a contracção durante cerca de dois

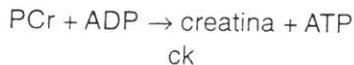


durante poucos segundos e de forma intensa, como podem manter uma actividade rítmica por períodos de tempo prolongados. O metabolismo muscular mostra-se bem adaptado a esta variação de actividade, possuindo várias vias de ressíntese de ATP, caracterizadas por diferenças no tempo de latência, na potência e na capacidade máxima de síntese de ATP.

Classicamente, as fontes musculares de ressíntese de ATP são separadas em fontes anaeróbias e fontes aeróbias, distinguindo-se pelo facto das vias anaeróbias se realizarem na ausência do oxigénio e a via aeróbia só prosseguir com a síntese de ATP na presença de oxigénio. Esta classificação está bastante difundida e é muito utilizada, embora o seu sentido tal como foi descrito acima não esteja totalmente correcto. Outra distinção entre vias anaeróbias e aeróbias baseia-se no local da célula em que ocorrem: as vias anaeróbias desenrolam-se no citoplasma da célula, enquanto a fonte aeróbia dá-se inteiramente no interior das mitocôndrias. Nas vias anaeróbias distinguem-se duas fontes: a via da creatina fosfato ou fonte anaeróbia aláctica e a via da glicólise ou fonte anaeróbia láctica. A fonte aeróbia inclui os processos metabólicos do ciclo de Krebs e da fosforilação oxidativa.

6.4.1 Via da creatina fosfato

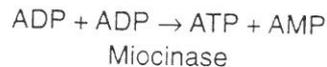
A síntese imediata de ATP depende da degradação da creatina fosfato e da transferência do grupo fosforil desta molécula para a molécula de ADP segundo a seguinte reacção:



Esta reacção é catalisada pelo enzima creatina cinase (ck), e é uma forma imediata de ressíntese de ATP e que serve para manter a concentração desta molécula durante os primeiros segundos de contracção. Embora variável conforme o estado de treino ou conforme o tipo de fibra muscular, a quantidade de creatina fosfato no interior das fibras

musculares varia entre 70-80 mmol. Kg⁻¹ de peso seco. Considerando um consumo de ATP de 10.5 mmol. Kg⁻¹ de peso seco, durante a realização de contracções isométricas, verifica-se que as reservas de creatina fosfato estão esgotadas ao fim de 7 a 8 segundos de contracção. No entanto, a completa depleção de creatina fosfato não acontece em intervalos de tempo tão curtos, sendo necessário várias repetições de exercício intenso para que tal aconteça. A justificação para que não tenha lugar o esgotamento das reservas de creatina fosfato logo após os primeiros segundos de contracção, deve-se ao funcionamento integrado das vias metabólicas e ao contributo para a síntese de ATP de outras fontes logo desde o início da contracção muscular. A taxa de degradação da creatina fosfato é superior nos primeiros segundos de contracção, sofrendo forte redução quando o exercício se prolonga para além dos dez segundos.

Uma segunda fonte imediata de ressíntese de ATP disponível no interior das fibras musculares resulta da acção do enzima adenilato cinase, também referida como miocinase. Este enzima catalisa a conversão de duas moléculas de ADP em uma molécula de ATP e uma molécula de AMP, segundo a seguinte reacção:



6.4.2 Glicólise e glicogenólise

A glicólise diz respeito a uma série de reacções que têm início com a utilização da glicose como substrato e tem como produtos ATP e ácido pirúvico. Em certas condições o ácido pirúvico é reduzido a ácido láctico, por acção do enzima lactato desidrogenase. A formação de ácido láctico com produção de ATP é referida como a via anaeróbia láctica, dado não necessitar do consumo de oxigénio.

A glicólise não é exclusivamente uma via anaeróbia, mas constitui sim a primeira via metabólica de utilização da glicose como substrato energético. A formação de ácido láctico constitui

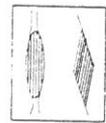
uma via
ciência
incapaci
taxa met
Deste m
acumul
seja por
demand
à capac
que têm
Particula
pouca c
ácido lác
do exerc
de ATP c

A via
mente d
de ácido
de ATP d
elevada
desde o
cerca de
com dur
requerem

Uma h
de que a
forma sig
após esgc
Esta hipót
cando-se
láctico logc

A conc
fibras mus
como font
intracelular
cose existe
genólise
glicogénio
disponibiliz
O aumento
dente de vé
os quais o
consequênc

Dados r
taxas de de
de quilogram



uma via final alternativa e que resulta da insuficiência de oxigénio no interior das células ou da incapacidade das mitocôndrias em manter uma taxa metabólica equilibrada com a taxa de glicólise. Deste modo, em condições de exercício intenso acumula-se ácido láctico no interior do músculo seja porque o aporte de oxigénio é inferior à sua demanda, ou porque a taxa de glicólise é superior à capacidade dos sistemas energéticos oxidativos que têm lugar no interior das mitocôndrias. Particularmente nas fibras musculares com pouca capacidade oxidativa, a produção de ácido láctico está mais associada à intensidade do exercício e às necessidades de ressíntese de ATP do que à insuficiência de oxigénio.

A via anaeróbia láctica, independentemente das razões que levam à acumulação de ácido láctico, é essencial para a ressíntese de ATP durante a realização de exercícios de elevada intensidade e num período que vai desde o início da contração até passado cerca de um minuto. No entanto, exercícios com duração superior a 30 segundos já requerem o contributo da fonte oxidativa.

Uma hipótese frequentemente colocada é de que a glicólise anaeróbia apenas contribui de forma significativa para a ressíntese de ATP após esgotadas as reservas de creatina fosfato. Esta hipótese, porém, não se comprova, verificando-se uma acumulação importante de ácido láctico logo após iniciada a contração muscular.

A concentração de glicose no interior das fibras musculares é reduzida e a sua utilização como fonte de energia depende das reservas intracelulares de glicogénio, um polímero de glicose existente no músculo e no fígado. A glicogenólise é o processo de degradação do glicogénio e que no músculo ocorre de modo a disponibilizar a glicose como fonte energética. O aumento da taxa de glicogenólise está dependente de vários mecanismos reguladores, entre os quais o aumento do cálcio intracelular, que é consequência da própria contração muscular.

Dados na literatura indicam a existência de taxas de degradação de glicogénio de 6.3 mmol. de quilograma de peso seco por segundo duran-

te 6 segundos de exercício máximo em cicloergómetro e de 3.4 mmol. Kg⁻¹.s⁻¹ para 30 segundos de sprint em cicloergómetro. A esta taxa e tendo em consideração concentrações de glicogénio em repouso de 200 a 500 mmol. Kg⁻¹ de peso seco, as reservas de glicogénio muscular esgotar-se-iam ao fim de aproximadamente dois minutos. O facto de tal não acontecer mostra que a taxa de degradação de glicogénio está sobre controlo fisiológico, designadamente sobre controlo por retroacção negativa dos produtos da glicólise.

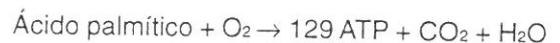
6.4.3 Via oxidativa

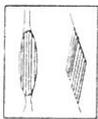
Actualmente reconhece-se que a via aeróbia (com consumo de oxigénio) contribui para a síntese de ATP durante a realização de esforços intensos e de curta duração. No entanto, esta via é particularmente necessária para a síntese de ATP em esforços com duração superior a um minuto e para a recuperação após esforços máximos.

Os processos oxidativos de síntese de ATP, que se dão totalmente no interior das mitocôndrias, permitem a síntese de quantidades muito superiores de ATP por cada molécula de glicose consumida. A reacção seguinte resume o processo oxidativo tendo como substrato a glicose:



A maior quantidade de energia que é libertada pela via oxidativa é o resultado do catabolismo da glicose ser mais completo pelos processos oxidativos do que o conseguido pelos processos fermentativos. A via oxidativa, ao contrário da glicólise, não depende exclusivamente da glicose como substrato, sendo também utilizados lípidos e aminoácidos como precursores energéticos. A reacção para o ácido palmítico, um ácido gordo muito utilizado pelo organismo humano como fonte energética, é a seguinte:





A quantidade de ATP sintetizado por cada molécula de ácido palmítico é superior à obtida com utilização da glicose, razão pela qual os lípidos constituem uma fonte de elevado potencial energético.

A ressíntese de ATP pela via aeróbia pode ser estimada pelo consumo de oxigénio, embora tendo em atenção que aproximadamente 10% do oxigénio captado pelo organismo é utilizado fora da mitocôndria e logo não envolvido na síntese de ATP. Através deste indicador foi possível verificar que o contributo da via aeróbia para a ressíntese de ATP durante a corrida em tapete rolante foi de 22%, 15 segundos após o início do exercício, e de 59% após dois minutos de exercício.

6.4.4 Potência e capacidade das vias musculares de ressíntese de ATP

A tabela 6.1 apresenta valores da potência e da capacidade máxima de cada um dos três sistemas metabólicos envolvidos na ressíntese de ATP no músculo esquelético. Da análise dos valores ressaltam as diferenças na capacidade máxima existentes entre as três vias, mostrando claramente a muito maior capacidade de produção de energia pela via oxidativa. Todavia, a importância das vias anaeróbias aparece sobressaída pelos valores da potência. Estas apresentam como vantagem serem rapidamente activadas no início da contração e possuem taxas de síntese de ATP mais elevadas, permitindo a realização de esforços intensos, embora durante períodos de tempo curtos. Considerando, por exemplo, um esforço de corrida máxima, em que a exigência de ATP pode alcançar um máxi-

mo de $10 \text{ mmol.Kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$, a contribuição aeróbia não excederá os 20-30%, dado que a potência máxima de síntese de ATP aerobiamente está situada em torno dos $2 \text{ mmol.Kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$.

6.5 PROPRIEDADES CONTRÁCTEIS

A resposta mecânica de uma fibra muscular, de uma unidade motora ou mesmo da totalidade do músculo a um impulso nervoso, é designada de resposta espasmódica ou contração espasmódica ("twitch contraction"). Do registo de uma contração espasmódica isométrica retiram-se diversos parâmetros que constituem propriedades contrácteis da respectiva fibra muscular, unidade motora ou músculo completo. De entre estas incluem-se: (1) período de latência; (2) tempo de contração; (3) pico de tensão; (4) tempo de relaxamento.

Período de latência. Este parâmetro corresponde ao atraso registado entre a chegada do potencial de acção à placa motora e o momento em que tem início o registo de tensão. Este intervalo dura poucos milissegundos e corresponde ao tempo necessário para que ocorram os processos de acoplamento excitação/contração e para que a tensão seja transmitida desde os elementos contrácteis até ao exterior. Este atraso, em condições normais e na ausência de fadiga, é ligeiramente superior na mulher, em resultado da maior extensibilidade das estruturas elásticas de transmissão de força.

Tempo de contração. O parâmetro tempo de contração diz respeito ao tempo que medeia entre o final do período de latência e o momento em que é alcançado o valor de

Tabela 6.1 - Valores de capacidade e de potência máximas (referências de Brooks, Fahey & White, 1996).

Via metabólica	Potência máxima (Kcal.min ⁻¹)	Capacidade Máxima (total de Kcal. disponíveis)
Fontes energéticas imediatas (ATP + CP)	36	11.1
Glicólise anaeróbia	16	15
Metabolismo oxidativo (reservas de glicogénio muscular e hepático e reservas lipídicas)	10	143280

^a O term

universidade técnica de lisboa
FACULDADE DE MOTRICIDADE HUMANA

anatomofisiologia

TOMO III

Funções da Vida Orgânica Interna

MARGARIDA ESPANHA
PEDRO PEZARAT CORREIA
AUGUSTO GIL PASCOAL
PAULO ARMADA DA SILVA
RAÚL OLIVEIRA



Ciências da Motricidade

Edições FMH • ANATOMOFISIOLOGIA - Tomo III • Margarida Espanha / Pedro Pezarat Correia / Augusto Gil Pascoal / Paulo Armada da Silva / Raúl Oliveira

TECNICA
boia
ANA
ade



logia do coração. Na segunda parte o tema é a circulação, onde caberá descrever os principais vasos do corpo humano, a física da circulação e os mecanismos de regulação da pressão arterial e do fluxo sanguíneo periférico. Embora não constitua nosso principal objectivo, serão referidos alguns aspectos da resposta do aparelho cardiovascular ao exercício.

4.1 ANATOMIA DO CORAÇÃO

4.1.1 Orientação e localização

O coração está localizado na cavidade torácica, na região do mediastino. Designa-se de mediastino o espaço da cavidade torácica situado entre os dois pulmões e que é delimitado em baixo pelo diafragma, em cima pelo orifício superior da cavidade torácica, à frente pelo esterno e cartilagens costais e atrás pela região dorsal da coluna vertebral e terço posterior das costelas. No mediastino, o coração ocupa a região anterior e inferior, relacionando-se à frente com o esterno e cartilagens costais, lateralmente com a face interna de cada um dos pulmões, em baixo com a porção central do diafragma, designada de centro frénico, e atrás com o esófago e outras estruturas anatómicas do mediastino posterior.

Em relaxamento, o coração apresenta uma forma em pirâmide triangular, onde se distinguem uma base, um vértice e três faces. A orientação do coração é tal que a sua base está projectada para trás e para cima e o seu vértice para a frente e para a esquerda. O *eixo anatómico* do coração define a sua orientação e corresponde à direcção que une o centro da base do coração ao seu vértice. Este eixo está orientado de cima para baixo, de trás para a frente e da direita para a esquerda. A orientação mais precisa de cada coração varia conforme o indivíduo, podendo ser mais próxima da vertical ou da horizontal, dependendo da morfologia do sujeito e, em particular, da morfologia do seu tórax.

4.1.2 Camadas e meios de fixação

O coração encontra-se no mediastino envolvido por membranas conjuntivas com a designação de pericárdios e que formam as camadas mais exteriores do coração. São duas as membranas pericárdicas: uma mais exterior e que encerra toda a área cardíaca, designada de pericárdio fibroso ou saco fibroso pericárdico; e uma segunda, situada por baixo da anterior, e que é uma membrana serosa com o nome de pericárdio seroso. O pericárdio fibroso é uma membrana conjuntiva resistente, cujos limites ultrapassam os limites do coração, chegando a envolver a raiz dos vasos que entram e saem do coração. Do pericárdio fibroso destacam-se vários ligamentos que servem de meios de união do coração às paredes do tórax e que contribuem para manter a posição do órgão. Estes ligamentos pericárdicos unem-se, à frente, à face posterior do esterno, em baixo, à face superior do centro frénico, atrás e em cima, às quatro primeiras vértebras dorsais e últimas vértebras cervicais.

O pericárdio seroso está situado imediatamente por dentro do pericárdio fibroso e, à semelhança de todas as outras membranas serosas, é constituído por dois folhetos: o folheto visceral, em contacto directo com o coração, e o folheto parietal, aplicado contra o anterior e em contacto com o pericárdio fibroso. Os dois folhetos delimitam entre si um espaço virtual: a cavidade pericárdica. Os limites do pericárdio seroso são idênticos aos do pericárdio fibroso, chegando igualmente a envolver parte dos grandes vasos, local onde é encontrada a linha de dobra dos folhetos visceral e parietal.

Imediatamente por baixo do pericárdio seroso, e em contacto com o seu folheto visceral, encontram-se o miocárdio, a porção muscular do coração. O miocárdio é formado por feixes musculares que tomam origem e inserção no esqueleto fibroso do coração, constituído por quatro anéis de tecido con-



juntivo que estão dispostos em torno dos dois orifícios aurículo-ventriculares e dos dois orifícios arteriais (ver adiante). Esta estrutura fibrosa separa o miocárdio em dois: um miocárdio auricular e um miocárdio ventricular.

A túnica mais interna do coração corresponde ao endocárdio, uma membrana fina que está em continuidade com o endotélio dos vasos que penetram e abandonam o coração.

4.1.3 Anatomia exterior do coração

A forma do coração permite que sejam reconhecidos na sua superfície exterior três faces, três bordos, uma base e um vértice. As três faces distinguem-se em face anterior ou esterno-costal (figura 4.1), orientada para cima, para a frente e ligeiramente para a direita, face inferior ou diafragmática (figura 4.2), orientada para baixo e para trás, e face lateral esquerda, orientada para a esquerda e em relação com o pulmão do mesmo lado.

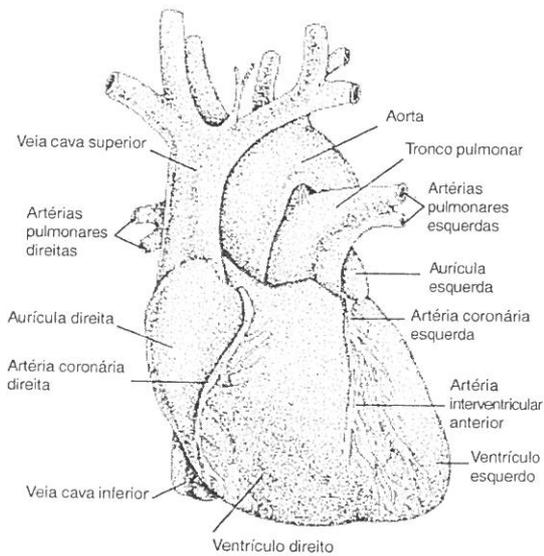


Figura 4.1 – Face anterior do coração.

As três faces estão divididas num terço superior e dois terços inferiores por um sulco que contorna toda a superfície externa do coração e que marca à superfície do órgão a

separação entre as aurículas e os ventrículos. Este sulco denomina-se sulco aurículo-ventricular e separa cada uma das faces num segmento auricular e num segmento ventricular. À superfície, este sulco corresponde ao septo aurículo-ventricular, que separa, no interior do órgão, as aurículas dos ventrículos (figura 4.3).

As faces anterior e inferior são percorridas, na direcção do eixo do coração, por dois sulcos designados, respectivamente, de sulco interventricular anterior e sulco interventricular posterior. No interior do coração estes sulcos correspondem ao septo interventricular, que faz a separação entre os dois ventrículos (figura 4.3). Deste modo, a porção das faces anterior e inferior situada à direita dos sulcos interventriculares respectivos corresponde ao ventrículo direito, enquanto a porção à esquerda faz parte do ventrículo esquerdo. As extremidades destes sulcos não se encontram alinhadas com o vértice do coração, estando desviadas para a direita, significando que o vértice do coração pertence inteiramente ao ventrículo esquerdo.

A base do coração é totalmente ocupada pelas aurículas e é dividida nos segmentos direito e esquerdo pelo sulco interauricular.

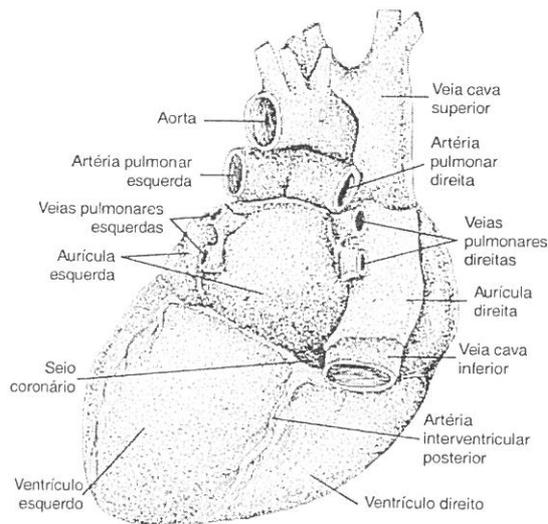


Figura 4.2 - Face inferior do coração.

À direita do se os orifícios inferior e, à e veias pulmonar querdas. Os e a artéria p face anterior à frente do c

O vértice ral, no quinto intersecção c a metade do maada linha n

4.1.4 Config

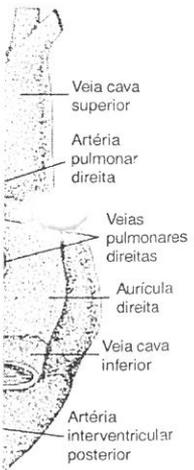
No seu in tro câmaras, separadas er reito e em au querdo. As c encontram-si vendo por is estas duas m estão separa septo interau septo, que é f ular nos tre interventricu culas e os ve do septo fibr um lado e d aurículo-ve aurículas cor

As auricul pela sua con ra do miocár parede inte auriculares a com paredes e posteriorm respectivos. l ventriculare ventrículos, a cios de entra sangue. Na



os ventrículos. Sulco aurículo-ventricular das faces num segmento ventricular corresponde que separa, no dos ventrículos

r são percorridos por dois sulcos, de sulco interventricular do coração es- septo interven- entre os dois e modo, a por- or situada à di- respecti- direito, enquan- te do ventrículo estes sulcos não n o vértice do para a direita, o coração per- ulco esquerdo. mente ocupada nos segmentos do interauricular.



Ventrículo direito

o coração.

À direita do sulco interauricular encontram-se os orifícios das veias cava superior e inferior e, à esquerda, os orifícios das quatro veias pulmonares, duas direitas e duas esquerdas. Os vasos arteriais, a artéria aorta e a artéria pulmonar, emergem ao nível da face anterior, situando-se o orifício pulmonar à frente do orifício aórtico.

O vértice do coração projecta-se, em geral, no quinto espaço intercostal esquerdo, na intersecção com uma linha vertical que passa a metade do comprimento da clavícula, a chamada linha médio-clavicular.

4.1.4 Configuração interior do coração

No seu interior o coração apresenta quatro câmaras, duas aurículas e dois ventrículos, separadas em aurícula direita e ventrículo direito e em aurícula esquerda e ventrículo esquerdo. As cavidades direitas e esquerdas encontram-se totalmente separadas, não havendo por isso passagem de sangue entre estas duas metades do coração. As aurículas estão separadas por uma parede muscular, o septo interauricular, e os ventrículos por um septo, que é fibroso no quarto superior e muscular nos três quartos inferiores, o septo interventricular. A separação entre as aurículas e os ventrículos é feita por intermédio do septo fibroso aurículo-ventricular, que de um lado e de outro, apresenta os orifícios aurículo-ventriculares, pelos quais as aurículas comunicam com os ventrículos.

As aurículas distinguem-se dos ventrículos pela sua conformação geométrica, espessura do miocárdio e pelo aspecto liso da sua parede interior. Ambas as cavidades auriculares apresentam uma forma cuboide com paredes finas e estão situadas superior e posteriormente em relação aos ventrículos respectivos. Para além dos orifícios aurículo-ventriculares que comunicam com os ventrículos, as aurículas apresentam os orifícios de entrada das veias que aí lançam o sangue. Na aurícula direita abrem-se a veia

cava superior e a veia cava inferior, enquanto na aurícula esquerda é quatro o número de orifícios venosos, correspondendo às duas veias pulmonares direitas e às duas veias pulmonares esquerdas.

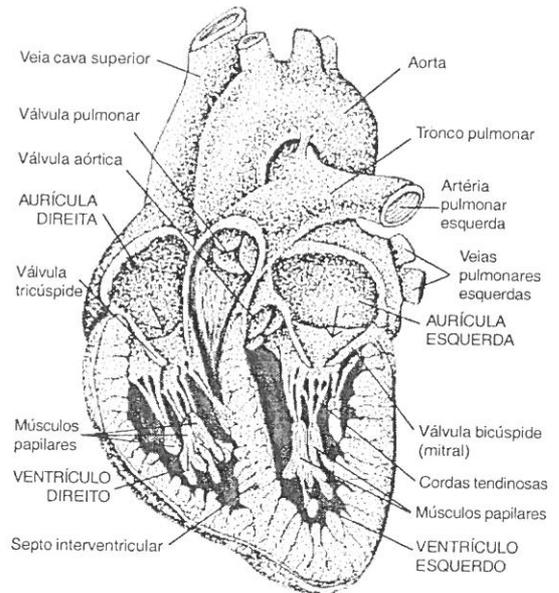


Figura 4.3 – Configuração interior do coração.

Os ventrículos, contrariamente às aurículas, possuem uma parede muscular espessa, em particular o ventrículo esquerdo. Estas cavidades têm a forma de uma pirâmide triangular, cujo vértice corresponde ao vértice do coração. Também ao contrário do que é característico das aurículas, a face interna da parede ventricular possui inúmeras saliências do miocárdio, que se projectam no lúmen ventricular. Estas saliências recebem a designação de colunas carnosas e agrupam-se em colunas carnosas de primeira, segunda e terceira ordem. A distinção entre os tipos de colunas carnosas é feita do seguinte modo: as colunas carnosas de primeira ordem são as mais proeminentes e são também designadas por pilares do coração ou músculos papilares, possuem uma das extremidades aderentes à parede do ventrículo e a outra extremidade livre, de onde se destacam fitas tendinosas que dão



pelo nome de cordas tendinosas e que se vão inserir nas válvulas aurículo-ventriculares (figura 4.3); as colunas de segunda ordem apresentam as duas extremidades unidas às paredes ventriculares e a parte média livre; as colunas carnosas de terceira ordem estão aderentes em toda a sua extensão à parede ventricular e apresentam-se como simples rugosidades do miocárdio ventricular. As colunas carnosas de segunda e terceira ordem são particularmente numerosas na região do vértice de ambos os ventrículos.

Os orifícios aurículo-ventriculares são ocupados por duas válvulas, ditas aurículo-ventriculares e cuja função é impedir o refluxo de sangue dos ventrículos, de novo para as aurículas durante a contracção do coração. Estas válvulas são formadas por tecido conjuntivo, com consistência membranosa, e estão divididas em valvas ou cúspides por incisuras que vão da extremidade livre, localizada ao centro da válvula, até próximo da base. A válvula aurículo-ventricular direita apresenta três valvas e é designada de válvula tricúspide. À esquerda, a válvula aurículo-ventricular divide-se em duas valvas, sendo designada de bicúspide ou válvula mitral. Na face ventricular destas válvulas inserem-se as cordas tendinosas dos músculos papilares. No ventrículo direito existem vários destes músculos, cujas cordas tendinosas terminam em cada uma das valvas. No ventrículo esquerdo distinguem-se dois músculos papilares: os pilares anterior e posterior.

Do coração saem dois vasos arteriais: o tronco pulmonar, que comunica com o ventrículo direito e se divide posteriormente na artéria pulmonar direita e artéria pulmonar esquerda, e a artéria aorta, que está no seguimento do ventrículo esquerdo. O sangue sai dos ventrículos para estas artérias através dos orifícios arteriais, que apresentam, cada um deles, o respectivo sistema valvular, formados por três válvulas ditas sigmóides ou semilunares, mais espessas à esquerda que à direita. Cada uma das válvulas sigmóides

possui um nódulo fibroso na sua extremidade livre, o nódulo de *Morgagni*, no caso da válvula pulmonar, e o nódulo de *Arantius*, no caso da válvula aórtica, que garantem uma oclusão mais efectiva destas válvulas.

4.1.5 Vasos coronários

O coração é irrigado por duas artérias coronárias, assim designadas pela sua disposição em coroa em torno do coração, que têm origem na porção ascendente da aorta, imediatamente acima do orifício aórtico. Estas duas artérias são a artéria coronária esquerda, ou anterior, e a artéria coronária direita, ou posterior. A artéria coronária esquerda, após a sua origem, dirige-se anteriormente, percorrendo a face anterior do coração ao longo do sulco interventricular anterior (figura 4.1). Esta artéria dá origem a vários ramos colaterais, incluindo a artéria aurículo-ventricular, cujo trajecto é feito ao longo da metade esquerda do sulco aurículo-ventricular chegando, em alguns casos, a anastomosar-se com a artéria coronária direita. A artéria coronária esquerda e os seus ramos colaterais irrigam, sobretudo, as faces anterior e esquerda do ventrículo esquerdo, a metade anterior do septo interventricular e a aurícula esquerda.

A artéria coronária direita, após a sua origem, dirige-se para a frente até alcançar o sulco aurículo-ventricular, caminhando de seguida ao longo da metade direita deste sulco até chegar ao sulco interventricular posterior (figura 4.2). Uma vez atingido este sulco, a artéria coronária direita percorre-o até à ponta do coração. A artéria coronária direita e seus ramos colaterais irrigam a aurícula direita, parede inferior de ambos os ventrículos e metade posterior do septo interventricular.

O sangue do coração é drenado por diversas veias, várias delas com um trajecto paralelo às artérias coronárias ou seus colaterais. As veias do coração convergem para uma estrutura venosa dilatada situada na metade posterior do sulco aurículo-ventricular, o chama-

do seio coronário.

4.2 O CORAÇÃO

Uma das particularidades deste estudo do funcionamento do coração é, em termos de propriedades físicas, a sua capacidade de se adaptar às necessidades do organismo. Assim, a frequência cardíaca varia de acordo com as necessidades do organismo, variando entre 60 e 180 batimentos por minuto.

A semelhança entre o coração humano e o coração de outros animais é notável. Assim, o coração humano tem uma capacidade de se adaptar às necessidades do organismo, variando entre 60 e 180 batimentos por minuto.

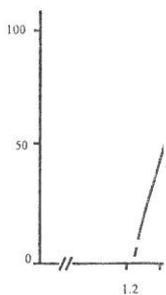


Figura 4.4 – Comparação entre o músculo

As semelhanças entre os dois tipos de coração são estudadas através de modelos matemáticos, assim como a sua adaptação às necessidades do organismo.

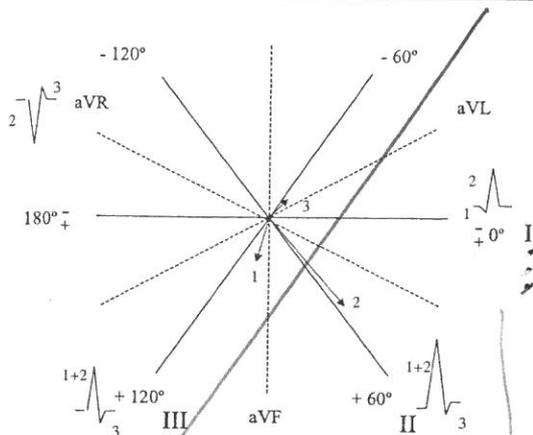
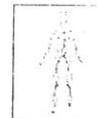


Figura 4.12 – Representação dos eixos das seis derivações no plano frontal com representação dos traçados típicos do complexo QRS em algumas das derivações. Numerado de 1 a 3 temos os vectores de despolarização dos ventrículos.

4.6.4 Medição da frequência cardíaca a partir do ECG

O ECG pode ser utilizado para obter o valor da frequência cardíaca instantânea. Sabe-se que o valor de frequência é dado pelo inverso do período o que equivale a dizer, para o caso da frequência cardíaca, que esta é igual ao inverso do ciclo cardíaco. A determinação da duração do ciclo cardíaco a partir do ECG é um procedimento muito simples, sendo utilizado, em geral, o intervalo entre os picos R, intervalo R-R. Após delimitado este intervalo, o passo seguinte é contar o número de quadrículas pequenas, com um milímetro de comprimento, dentro desse intervalo, obtendo-se assim o número de quadrículas correspondentes a um período. A frequência cardíaca é então calculada dividindo o intervalo unitário de tempo pelo número de quadrículas do intervalo R-R. No caso mais frequente, em que o avanço do papel durante o registo é feito a uma velocidade de 25 mms⁻¹, um minuto equivale a 1500 quadrículas de um milímetro e será este o valor a ser dividido pelo número de quadrículas do intervalo R-R. Se este intervalo tiver 25 mm (25 quadrículas pequenas) a frequência cardíaca será igual a 1500/25, ou seja, 60 bat.min⁻¹. Um outro método, mais rápido mas um pouco menos rigoroso, é utilizar, não as

quadrículas de um milímetro, mas as de cinco milímetros. Neste caso, o valor a ser dividido é 300, considerando que a velocidade de registo é a mesma.

4.7 CIRCULAÇÃO SANGUÍNEA

A organização geral da circulação sanguínea está representada na figura 4.13. Esta é formada por dois sistemas fechados de vasos, um a pequena circulação, ou circulação pulmonar, o outro a grande circulação, ou circulação sistémica. O sangue é bombeado dos ventrículos para as grandes artérias, que em seguida se ramificam progressivamente em artérias de menor calibre. Passa, em seguida, na circulação capilar, e regressa ao coração através da circulação venosa. Considerando os aspectos organizacionais e estruturais mais gerais, não existem diferenças entre a pequena e a grande circulação. No entanto, estas diferem nos valores absolutos de pressão sanguínea, sendo esses valores inferiores na circulação pulmonar reflectindo a menor distância que tem de ser percorrida pelo sangue.

4.7.1 Estrutura geral dos vasos sanguíneos

Os vasos sanguíneos dividem-se em três grandes tipos: as artérias, os capilares e as veias. Devido às suas características morfológicas e funcionais, as artérias são vasos de pressão e de resistência, os capilares vasos de trocas e as veias vasos de armazenamento. Com excepção dos capilares, todos os restantes vasos apresentam uma parede formada por três túnicas: uma túnica interna, a íntima; uma túnica média, muscular, e uma túnica externa, a adventícia (figura 4.14).

A *íntima* é formada por um endotélio, que forra interiormente o vaso, por uma fina membrana conjuntiva, a lâmina própria, sobre a qual assenta o endotélio, e por uma membrana elástica interna, que faz a separação entre a íntima e a túnica média.



médio e pequeno calibre, designadas, alternativamente, de artérias musculares. As artérias terminam nas arteríolas, que são os últimos vasos arteriais a apresentar as três camadas.

As artérias de grande calibre são vasos em que o sangue circula com uma pressão elevada e que oscila entre um valor máximo, sistólico, e um valor mínimo, diastólico, constituindo o chamado pulso de pressão. Estas artérias possuem uma maior quantidade de fibras elásticas, necessárias para assegurar uma boa resposta elástica às variações de pressão.

As artérias de médio e pequeno calibre são artérias que distribuem o fluxo sanguíneo para os órgãos e apresentam um maior desenvolvimento da camada muscular, o que lhes permite participar na redistribuição do fluxo sanguíneo pelos vários órgãos.

As arteríolas são os vasos que se abrem na circulação capilar. Possuem uma camada muscular que permite a vasoconstrição e vasodilatação. O calibre reduzido destes vasos e a sua variação por contracção ou relaxamento da camada muscular, fazem com que a resistência que opõem ao fluxo sanguíneo seja acentuada e muito variável. Por este motivo, estes constituem os chamados vasos de resistência.

Capilares

A circulação capilar permite as trocas entre o sangue e os tecidos, razão pela qual os capilares são designados de vasos de trocas. A organização da circulação capilar inclui as metarteríolas e os vasos capilares propriamente ditos. As metarteríolas estão na continuidade das arteríolas e comunicam directamente com as vénulas por um ramo anastomósico de onde nascem inúmeros vasos capilares. No ponto de origem dos capilares existe um esfíncter formado por algumas células musculares, o chamado esfíncter pré-capilar. Este tem por função regular o fluxo de sangue em cada um dos capilares, de

acordo com a actividade metabólica das células vizinhas.

Os vasos capilares possuem um diâmetro muito reduzido, que varia entre os 7 e os 9 μm , um comprimento de cerca de 1 mm e podem ser classificados de acordo com a sua permeabilidade em contínuos, fenestrados e sinusoidais. Os capilares *contínuos* apresentam um endotélio sem espaços entre as células e com uma permeabilidade bastante reduzida. Encontram-se no tecido nervoso, formando a chamada barreira hemato-encefálica. Os capilares *fenestrados* apresentam ao longo do endotélio as fenestras, locais das células endoteliais em que não existe citoplasma e em que a membrana celular é mais delgada. Estas fenestras conferem uma maior permeabilidade e este tipo de capilares que se situam em locais como o intestino delgado e o rim, onde a permeabilidade é grande. Os capilares *sinusoidais* são os que possuem maior diâmetro e em que as fendas são mais desenvolvidas. Dentro deste tipo de capilares distinguem-se os sinusóides e os seios venosos. Estes últimos existem no fígado, medula óssea e baço, locais onde em alguns pontos do endotélio não existe membrana basal e em que os espaços são grandes ao ponto de permitir o trânsito de células.

Veias

As vénulas drenam o sangue dos capilares e têm uma constituição semelhante a estas. Em continuidade com as vénulas estão as pequenas veias, que já apresentam uma camada muscular delgada e uma adventícia (figura 4.14, B). Estas veias de pequeno calibre vão convergindo, formando as veias de médio calibre e estas as de grande calibre.

As veias com diâmetro superior a 2 mm possuem no seu interior válvulas, que impedem o fluxo retrógrado da coluna de sangue (figura 4.14, C). Estas válvulas consistem em duas pregas da íntima que se sobrepõem ao centro da veia e são em maior número nas

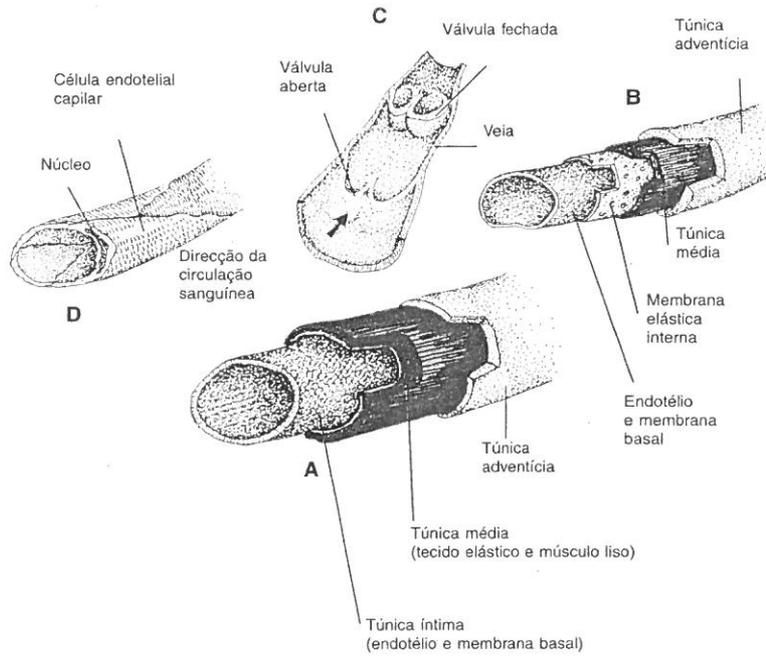
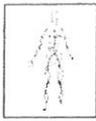


Figura 4.14 – Estrutura dos vários tipos de vasos sanguíneos: artéria elástica de grande calibre (A); veia (B); pormenor do sistema de válvulas venosas (C); capilar (D).

veias do membro inferior do que nas do membro superior. A incompetência das válvulas venosas, por dilatação das veias, dá origem às chamadas veias varicosas, caracterizadas por aumento da pressão venosa e por estase do sangue. O surgimento de varizes está associado a uma predisposição genética mas é facilitado pelas situações em que se assiste a um aumento da pressão nas veias, como é o caso da gravidez ou da permanência por longos períodos de tempo na posição de pé.

4.7.2 Circulação sistémica

O sangue entra na circulação sistémica após a sua saída do ventrículo esquerdo pela artéria aorta e regressa à aurícula direita através de duas veias: a veia cava inferior e a veia cava superior que drenam respectivamente o sangue venoso dos membros inferiores, abdómen e tórax, e dos membros superiores e cabeça.

Circulação arterial: ramos da aorta

A aorta pode ser dividida em três porções: aorta ascendente, crossa da aorta e aorta

O tronco bráquio-cefálico divide-se seguidamente nas artérias subclávia direita e carótida primitiva direita. A artéria subclávia direita continua-se pela artéria axilar e seguidamente artéria umeral. Esta última divide-se no antebraço nos seus ramos terminais: as artérias radial e cubital. A artéria carótida primitiva direita divide-se, no pescoço, em dois ramos terminais: a artéria carótida interna e a artéria carótida externa. A carótida interna penetra na cavidade craniana e é responsável pela irrigação do encéfalo. O ponto de bifurcação da carótida primitiva é uma região ligeiramente dilatada, formando o seio carotídeo, local que aloja importantes receptores nervosos implicados na regulação da pressão arterial e da respiração (ver adiante). As artérias carótida primitiva esquerda e subclávia esquerda têm um trajecto idêntico às homólogas do lado direito.

descendente. Esta em aorta descendente a aorta destaca v

Aorta ascendente têm origem duas já fizemos refer coronárias direita

Crossa da aorta ponto de origem, curvatura para a nada de crossa três artérias de responsáveis pe coço e membros a esquerda est bráquio-cefálico, esquerda e a art

De entre os rar de grosso calibre superior e a artéri artérias genitais. artéria ilíaca primí dem-se em dois ra o membro inferior nível da face poste

Circulação venci

O retorno ven é feito por interr coronário, que di veia cava inferior cabeça e membr inferior, que dren bros inferiores. /



descendente. Esta última pode ser subdividida em aorta descendente torácica e aorta descendente abdominal. No seu trajecto a aorta destaca várias artérias colaterais.

Aorta ascendente. Da aorta ascendente têm origem duas artérias colaterais, às quais já fizemos referência. São elas as artérias coronárias direita e esquerda, ambas responsáveis pela irrigação do coração.

Crossa da aorta. Imediatamente acima do ponto de origem, a artéria aorta descreve uma curvatura para a esquerda e para trás, designada de crossa da aorta. Da crossa nascem três artérias de grosso calibre que vão ser responsáveis pela irrigação da cabeça, pescoço e membros superiores. Da direita para a esquerda estas artérias são: o tronco bráquio-cefálico, a artéria carótida primitiva esquerda e a artéria subclávia esquerda.

Aorta descendente. Na região torácica a aorta destaca ramos parietais que se destinam a irrigar a parede torácica e ramos viscerais que irrigam as vísceras torácicas.

Os ramos parietais da aorta descendente torácica são as artérias intercostais posteriores, em número de doze de cada lado e que irrigam a parede torácica, e as artérias frénicas superiores, que irrigam parte do diafragma. Os ramos viscerais incluem as artérias brônquicas e as artérias esofágicas.

Na região abdominal da aorta nascem diversos ramos viscerais, que são responsáveis pela irrigação dos órgãos abdominais, e ramos parietais, que irrigam os músculos e estruturas esqueléticas do abdómen.

De entre os ramos viscerais, distinguem-se artérias ímpares e artérias bilaterais. As artérias ímpares são de grosso calibre, em número de três e são, de cima para baixo, o tronco celíaco, a artéria mesentérica superior e a artéria mesentérica inferior. Os ramos bilaterais são as artérias renais, artérias supra-renais e artérias genitais. Os ramos parietais são a artéria frénica inferior, artéria lombar, artéria sagrada média e artéria ilíaca primitiva, constituindo esta última o ramo terminal da aorta. As artérias ilíacas primitivas dividem-se em dois ramos terminais: a artéria ilíaca interna e a artéria ilíaca externa. A artéria ilíaca externa irriga o membro inferior e está em continuidade com a artéria fémural, que passa a designar-se artéria poplíteia ao nível da face posterior do joelho. Esta dá origem às artérias poplíteia, tibial posterior e tibial anterior.

Circulação venosa

O retorno venoso da circulação sistémica é feito por intermédio de três veias: o seio coronário, que drena o sangue do coração; a veia cava inferior, que recebe o sangue da cabeça e membros superiores, e a veia cava superior, que drena o sangue do tronco e membros inferiores. As veias têm, em geral, um

trajecto paralelo ao das artérias correspondentes e, por isso, recebem frequentemente o mesmo nome. As veias são, porém, em maior número do que as artérias. Distinguem-se três tipos de veias, as veias superficiais, as veias profundas, frequentemente satélites das artérias, e os seios venosos. Estes últimos encontram-se, sobretudo, na calote craniana e no coração.

); veia (B); pormenor

da aorta

em três porções:
a aorta e aorta

divide-se seguida-
direita e carótida
lávia direita conti-
nuidamente artéria
no antebraço nos
as radial e cubital.
eita divide-se, no
mínimo a artéria
irrotina externa. A
idade craniana e é
encéfalo. O ponto
itiva é uma região
o seio carotídeo,
eptores nervosos
essão arterial e da
térias carótida pri-
querda têm um tra-
o lado direito.



Veias da cabeça e pescoço. O sangue da cabeça e pescoço é drenado pelas veias jugular interna e externa. Na região superior do tórax, estas duas veias reúnem-se com a veia subclávia para formar o tronco venoso bráquio-cefálico. A veia jugular externa recolhe o sangue venoso das zonas superficiais e a veia jugular interna, de maior calibre que a anterior, drena o sangue das veias da face e dos seio venosos da cavidade craniana, estes últimos formados por espaços da *dura máter*.

Veias do membro superior. No antebraço, as principais veias são a veia cefálica, veia radial e veia cubital. Na prega do cotovelo estas três veias convergem, originando as veias cefálica e basílica, que sobem ao longo do braço. Na axila a veia cefálica une-se à veia basílica donde se origina a veia axilar, que, por sua vez, se continua pela veia subclávia.

Veias do tórax. A drenagem do tórax é feita por três vasos venosos, os dois troncos bráquio-cefálicos e a veia ázigos (ímpar). Estes três vasos desembocam na veia cava superior.

Veias do abdómen. Parte do sangue da região abdominal, designadamente da parede posterior do abdómen, é drenado pelas veias abdominais ascendentes até à veia ázigos, que seguidamente termina na veia cava superior. Nas restantes regiões e órgãos abdominais, o sangue regressa ao coração pela veia cava inferior. Na região pélvica, a veia ilíaca interna reúne-se com a veia ilíaca externa, oriunda do membro inferior, dando origem à veia ilíaca primitiva. As duas veias ilíacas primitivas formam a veia cava inferior. Na região abdominal a drenagem de sangue de uma boa parte das vísceras, como o estômago e intestino, é feito através de um sistema porta. Os capilares e as veias com origem nestes órgãos reúnem-se numa grande veia, a veia porta, que no fígado se abre numa segunda circulação capilar, formando os sinusóides hepáticos. Estes, seguidamente, são drenados para a veia cava inferior, por intermédio das veias hepáticas.

Veias do membro inferior. A drenagem venosa do membro inferior é feita, à semelhança com a do membro superior, por veias profundas e superficiais. As primeiras são pares de veias que caminham paralelamente às artérias e que recebem o mesmo nome. Temos assim as veias tibiais anteriores e posteriores e peroniais. As veias anteriores e posteriores juntam-se ao nível do joelho formando a veia popliteia, que continua pela veia femoral. Nas veias superficiais temos, entre outras, a veia safena interna, com origem na face dorsal do pé e com um trajecto ascendente até à região inguinal, onde se junta à veia femoral.

4.7.3 Circulação pulmonar

O sangue entra na circulação pulmonar após a sua saída do ventrículo direito pelo tronco pulmonar que logo se divide nas artérias pulmonares, direita e esquerda e regressa à aurícula esquerda através de quatro veias: duas veias pulmonares direitas e duas veias pulmonares esquerdas. A circulação pulmonar é responsável pelo aporte de sangue até aos locais de trocas de gases nos pulmões, permitindo a troca de dióxido de carbono e oxigénio entre os capilares pulmonares e os alvéolos. O fluxo de sangue na circulação pulmonar é idêntico ao fluxo na circulação sistémica. Em termos hemodinâmicos, a circulação pulmonar, uma vez que o sangue é transportado ao longo de um per-

curso mais curto, apresenta valores de pressão inferiores aos registados na circulação sistémica.

4.8 DINÂMICA DA CIRCULAÇÃO

A circulação sanguínea assegura o transporte de gases e nutrientes pelo organismo e regula esse transporte através das variações do débito cardíaco. O fluxo de sangue ao longo do sistema de vasos é mantido pelo gradiente de pressão hidrostática que existe entre o ponto inicial e final da circulação, respectivamente o ventrículo esquerdo e a aurícula direita, para a circulação sistémica, e o ventrículo direito e a aurícula esquerda, para a circulação pulmonar. A competência do coração traduz-se na manutenção deste gradi-

ente, que cons-
à manutenção

4.8.1 Pressão

A pressão h-
peito à força q-
bre a parede d-
geral medida p-
coluna de um l-
uma coluna de
sa em milímetr-

A pressão :
da circulação
lação:

De acordo
pende do flux-
cia imposta pe-
permite deduz
dos três parâ-
partir da varia-
se o fluxo se m-
da resistência
da pressão sa-
mente, que o t-
tos da circula-
diente de pres-
imposta ao flu-

4.8.2 Resistê

A resistênc-
neo é dada pe-
na a resistênc-
vaso e com a
Poiseuille ten-

Nesta exp-
diente de pre-



5.5 VENTILAÇÃO E EQUILÍBRIO ÁCIDO-BASE

5.6 ADAPTAÇÕES RESPIRATÓRIAS AO EXERCÍCIO FÍSICO

5.6.1 Adaptações da ventilação ao exercício

5.6.2 Outras adaptações respiratórias ao exercício

5.1 ESTRUTURA E FUNÇÃO DOS ÓRGÃOS DO APARELHO RESPIRATÓRIO

5.1.1 Introdução

O termo respiração compreende vários processos que têm por finalidade a distribuição de O_2 pelas células e a remoção de CO_2 produzido no decurso do metabolismo celular. Estes processos incluem:

- a ventilação pulmonar responsável pelo movimento do ar de, e para, os pulmões;
- a troca de gases respiratórios (CO_2 e O_2) ao nível dos pulmões, também designado por hematose ou respiração externa;
- o transporte de CO_2 e O_2 no sangue;
- as trocas gasosas entre o sangue e os tecidos, também designado por respiração interna.

O termo respiração aplica-se igualmente ao conjunto de processos celulares relacionados com a produção de energia e que implicam a utilização de O_2 e produção de CO_2 .

Genericamente, o aparelho respiratório é constituído pelos pulmões e por um conjunto de órgãos, as vias aéreas, que permitem o movimento de ar entre o exterior e o interior dos pulmões, onde se encontram alojadas as principais estruturas implicadas mais directamente nas trocas gasosas, os alvéolos.

Do ponto de vista funcional, o aparelho respiratório pode dividir-se em duas zonas:

1) *zona de trocas*, que integra os bronquíolos respiratórios, o ducto alveolar e os alvéolos; e 2) *zona condutora* que corresponde às vias aéreas. Nesta zona incluem-se órgãos como o nariz, a faringe, a laringe, a traqueia, os brônquios e as respectivas subdivisões (árvore brônquica).

5.1.2 Pulmões e pleuras

Os pulmões são órgãos pares que ocupam toda a cavidade torácica com excepção da porção central, o *mediastino*, preenchida pelo coração, os grandes vasos e o esófago. São constituídos por tecido conjuntivo elástico (*parênquima pulmonar*), apresentando uma morfologia cónica, cuja base acenta no diafragma e o vértice se situa imediatamente abaixo das clavículas. As faces anterior, externa e posterior contactam com a grelha costal. A face interna delimita o mediastino, apresentando uma depressão, o *hilo pulmonar*, por onde entram e saem os vasos sanguíneos dos pulmões. O hilo é igualmente o local de entrada dos dois brônquios principais, a partir dos quais se desenvolve toda a árvore brônquica.

Os dois pulmões diferem quanto à forma. O pulmão esquerdo é mais pequeno que o direito, apresentando uma pequena chanfradura na face interna que lhe permite acomodar-se à morfologia do coração. O pulmão direito apresenta-se subdividido em três porções ou lobos pulmonares (superior, médio e inferior), enquanto o pulmão esquerdo somente apresenta dois lobos (superior e inferior) (Figura 5.1).



Figura 5.1 – Constituição

Cada um dos pulmões é revestido por uma fina membrana serosa denominada *pleura*. A constituição se idêntica que cobre a face externa do diafragma e a face superior do diafragma continua-se pelo coração e a face externa do mediastino.

As pleuras dividem-se em três compartimentos onde se localizam os vasos sanguíneos; e os espaços pleurais, entre os folhetos *pleurais*, totalmente preenchidos com o líquido pleural, permitindo o deslizamento. Este líquido lubrifica a grelha costal e o coração, facilitando o deslizamento possível o deslizamento pleurais, a separação

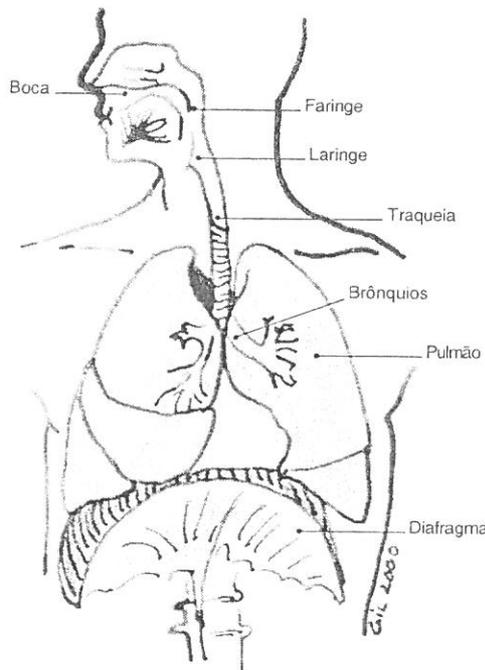


Figura 5.1 – Constituição geral do aparelho respiratório.

Cada um dos pulmões é envolvido por uma fina membrana serosa, a *pleura*, em cuja constituição se identifica um *folheto visceral*, que cobre a face externa dos pulmões, e um *folheto parietal*, aderente à grelha costal e face superior do diafragma. Este folheto continua-se pelo coração, formando a parede externa do mediastino.

As pleuras dividem a cavidade torácica em três compartimentos: um central, o mediastino, onde se localizam o coração e os grandes vasos sanguíneos; e dois laterais, os compartimentos pleurais, que alojam os pulmões. Entre os folhetos pleurais existe a *cavidade pleural*, totalmente preenchida por um líquido, o líquido pleural, produzido pelas próprias pleuras. Este líquido funciona como lubrificante, facilitando o deslizamento dos pulmões com a grelha costal e o diafragma. Apesar de ser possível o deslizamento entre os dois folhetos pleurais, a separação de ambos é dificultada

pela pressão negativa intra-pleural. Em consequência, os pulmões acompanham o movimento da grelha costal, sendo forçados a expandirem-se ou a recolherem-se de acordo com a variação de volume da caixa torácica associada aos movimentos ventilatórios.

5.1.3 Zona Condutora

Fazem parte das vias aéreas as fossas nasais, a boca¹, a faringe, a laringe, a traqueia e toda a árvore brônquica. A principal função da zona condutora ou das vias aéreas é a de possibilitar a passagem do ar inspirado desde a atmosfera até à zona de trocas gasosas e a de conduzir o ar expirado no sentido inverso. Desempenham ainda funções de purificação, humedecimento e aquecimento do ar inspirado estando, igualmente, envolvidas na produção de sons.

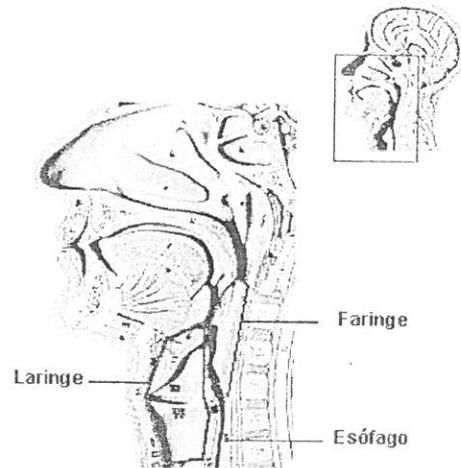


Figura 5.2 – Localização da faringe e laringe.

Vias aéreas

A cavidade nasal localiza-se no interior do nariz. Abrem para o exterior através de dois orifícios, as narinas, e continuam-se posteriormente pela faringe (nasofaringe), atra-

¹ ver Cap. 3 – Aparelho Digestivo.



vés dos coanes. A região imediatamente atrás das narinas, o vestibulo, é revestida de pêlos que desempenham um importante papel na purificação do ar inspirado ao reterem impurezas. A cavidade nasal é dividida pelo septo nasal em duas cavidades, as fossas nasais. O septo é uma lâmina perpendicular cuja metade anterior é cartilaginosa e a metade posterior é formada pelos ossos vômer e lâmina perpendicular do etmóide. Na parede externa das fossas nasais é possível encontrar três saliências, os cornetos, os quais formam passagens estreitas, os meatos. Revestidos por uma mucosa altamente irrigada, os meatos são fundamentais na climatização do ar inspirado.

A *faringe* é um canal situado atrás do palato que comunica com as cavidades nasal e bucal, em cima, e com a laringe, em baixo (Figura 5.2). Constituída por tecido muscular liso e uma mucosa, de composição variável, a faringe pode dividir-se em três regiões: *orofaringe*, porção da faringe que se relaciona com a cavidade bucal; *nasofaringe*, que está associada à cavidade nasal e *laringofaringe*, que está relacionada com a laringe e o esôfago. A separar a nasofaringe da orofaringe encontra-se o palato mole que não é mais que o prolongamento cartilaginoso do palato duro (lâmina óssea formada pelos dois maxilares superiores e os ossos palatinos e que constitui o pavimento das fossas nasais e o tecto da cavidade bucal).

A *laringe* encontra-se na continuidade da faringe, estendendo-se ao longo de 5 cm, desde o nível de C4-C5 (Figura 5.2). Relaciona-se superiormente com o osso hioide, ao qual se encontra ligada, e inferiormente com a traqueia. A laringe é formada por um conjunto de 9 cartilagens, 3 pares (arritnóides, cuneiformes e corniculadas) e 3 ímpares (epiglote, tiróide e cricóide). As cartilagens laríngeas encontram-se unidas entre si por membranas, ligamentos e músculos, sendo todas formadas por cartilagem hialina, à excepção da epiglote, que é constituída por cartilagem elástica. Os músculos ao nível da laringe podem dividir-se em

extrínsecos e intrínsecos. Os primeiros responsáveis pelos movimentos ascendente e descendente da laringe e os segundos pela abertura e encerramento da epiglote assim como pela regulação da tensão das cordas vocais.

A laringe é um órgão altamente especializado que desempenha duas importantes funções: 1) produção de voz, dado que aloja no seu interior as cordas vocais; 2) funcionar como mecanismo selector do trajecto do ar e alimentos. Os alimentos são encaminhados para o esôfago, enquanto o ar é dirigido para a traqueia. Para o desempenho desta última função a laringe fecha-se com a chegada dos alimentos vindos da faringe e abre-se com a chegada do ar. Na realidade, não é a laringe que se abre e fecha mas antes o orifício de entrada da laringe, a glote, que graças ao movimento ascendente e descendente da extremidade livre da cartilagem epiglote, pode ser aberto ou encerrado. Com efeito, a cartilagem epiglote, localizada imediatamente atrás da língua, apresenta um ponto de fixação na cartilagem tiroideia e uma porção livre que se movimenta para cima e para baixo, com fulcro no ponto de fixação. Assim, sempre que a epiglote baixa, a glote encerra e quando a extremidade livre da epiglote se eleva, a glote abre-se. Se alguma substância, que não seja ar entra acidentalmente na glote é desencadeado, imediatamente, o reflexo da tosse (ver caixa), que obriga à expulsão do elemento estranho.

A *traqueia* é um tubo flexível formado por aros cartilaginosos (cartilagem hialina) em forma de "C", incompletos posteriormente, que se estende desde o nível de C5 até T5. Origina-se na laringe e dirige-se para baixo ao longo do pescoço. Passa à frente do esôfago e ao nível do mediastino divide-se em dois tubos de calibre menor, os *brônquios principais* direito e esquerdo. Estes, orientados obliquamente para baixo, penetram nos pulmões ao nível do hilo pulmonar (Figura 5.3).

Uma vez no interior dos pulmões, cada um dos brônquios principais divide-se em tu-

bos de calibre tos, até atingir cas gasosas). tentes no inter das subdivisões principais, atriil *brônquica*.

A primeira c imediatamente dá origem aos direita e dois à correspondênc pelo que são, *brônquios loba* subdividem-se *terciários* ou s vez se dividir cessivamente re brônquica, *terminais*, com se continuam com cerca de tencem já às



Lobc

Figura 5.3



primeiros res-ascendente e segundos pela epiglote assim ão das cordas

nte especializa-
tantes funções:

e aloja no seu
uncionar como

do ar e alimen-
nhados para o

ido para a tra-
esta última fun-
hegada dos ali-
ã-se com a che-
é a laringe que

ri de entra-
raças ao movi-
nte da extremi-
a, pode ser aber-

a, a cartilagem
ente atrás da lín-
cação na cartila-
re que se movi-

o a extremidade
lote abre-se. Se

jeja ar entra aci-
adeado, imedia-
(ver caixa), que

o estranho.

ível formado por
hialina) em for-
ente, que

C5 até T5. Origi-
ara baixo ao lon-
do esófago e ao

em dois tubos
ios principais di-
idos obliquamen-

os pulmões, cada
divide-se em tu-

bos de calibre sucessivamente mais estreitos, até atingirem os alvéolos (zona de trocas gasosas). A este conjunto de tubos existentes no interior dos pulmões que resultam das subdivisões sucessivas dos brônquios principais, atribui-se a designação de *árvore brônquica*.

A primeira divisão dos brônquios principais, imediatamente após entrarem nos pulmões, dá origem aos *brônquios secundários*, três à direita e dois à esquerda. Estes brônquios têm correspondência com os lobos dos pulmões, pelo que são, muitas vezes, designados por *brônquios lobares*. Os brônquios secundários subdividem-se, dando lugar aos *brônquios terciários* ou *segmentares*, os quais, por sua vez se dividem em brônquios de calibre sucessivamente mais reduzido. No final da *árvore brônquica*, encontram-se os *bronquíolos terminais*, com cerca de 1 mm de diâmetro que se continuam pelos *bronquíolos respiratórios*, com cerca de 0,5 mm de diâmetro, que pertencem já às estruturas da zona de trocas.

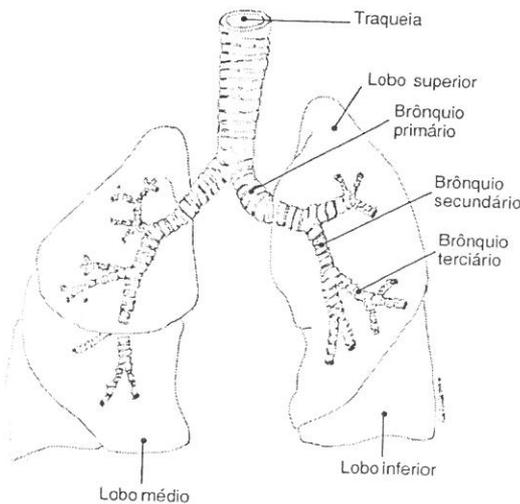


Figura 5.3 – Brônquios principais e respectivas subdivisões.

Função da zona condutora

As vias aéreas desempenham um papel fundamental na climatização (aquecimento e humedecimento) e purificação do ar inspirado. Adicionalmente estão na origem de dois importantes reflexos, os reflexos da tosse e espirro, responsáveis pela remoção de corpos estranhos e/ou irritantes das vias respiratórias.

A climatização do ar inspirado é conseguido, essencialmente, pelo contacto do ar com a mucosa das fossas nasais que apresenta uma elevada irrigação sanguínea superficial (plexo capilar).

As fossas nasais contribuem igualmente na purificação do ar inspirado. Os pêlos das narinas filtram as grandes partículas contidas no ar que inspiramos, permitindo a sua fixação às paredes das fossas nasais com auxílio do muco nasal. A remoção das partículas para o exterior é feita pela faringe através do movimento dos cílios vibráteis existentes na parede das vias aéreas.

Reflexos da tosse e espirro

Os reflexos da tosse e espirro têm por função a remoção de corpos estranhos alojados nas vias aéreas. As paredes dos brônquios e traqueia contam com um conjunto de receptores nervosos sensíveis à presença de partículas estranhas ou substâncias irritantes. Sempre que esses receptores são estimulados, são enviados impulsos nervosos ao bulbo raquidiano (centro de controlo automático da respiração) através do nervo vago. A chegada ao bulbo de impulsos oriundos dos brônquios e /ou traqueia desencadeia uma resposta reflexa que se processa nas seguintes fases:

- a) inspiração profunda, durante a qual são inspirados cerca de 2,5 litros de ar;
- b) encerramento da epiglote e das cordas vocais, o que assegura a manutenção do ar no interior dos pulmões e aumento da pressão intra-abdominal;



- c) contração vigorosa dos músculos abdominais, o que provoca a subida das vísceras abdominais em direcção ao diafragma e a elevação da pressão intrapulmonar para valores perto dos 100 mmHg;
- d) abertura brusca da epiglote e saída do ar dos pulmões a grande velocidade. A passagem desta corrente de ar tão intensa nas vias aéreas provoca a remoção de qualquer partícula estranha que se encontre aí alojada.

No reflexo do espirro, a resposta reflexa acontece em etapas semelhantes às que acabamos de descrever a propósito do reflexo da tosse. A principal diferença refere-se ao local onde são detectadas as partículas estranhas ou a substância irritante. Enquanto no reflexo da tosse a resposta é desencadeada a partir de estímulos vindos de receptores localizados nos brônquios e/ou traqueia, no reflexo do espirro a resposta é desencadeada a partir de estímulos vindos de receptores localizados na cavidade nasal. Outra diferença refere-se à via aferente utilizada em ambos os reflexos: na tosse são utilizadas fibras aferentes do nervo vago enquanto no espirro os impulsos originados nos receptores periféricos chegam ao centro de processamento através de fibras do nervo trigémino.

No reflexo do espirro a úvula e o palato mole baixam durante a fase de expulsão brusca do ar dos pulmões, o que permite que o ar expirado seja conduzido a grande velocidade para as fossas nasais. Este encaminhamento do ar não é perfeito, originando que uma grande quantidade de ar passe pela cavidade bucal.

5.1.4 Zona de trocas gasosas

Na porção distal da árvore brônquica localizam-se as estruturas da zona de trocas, que incluem os bronquíolos terminais, o ducto alveolar e os alvéolos (Figura 5.4). Os alvéolos são pequenos sacos membranosos, dispostos em torno de um mesmo ducto alveolar, onde ocorrem preferencialmente as trocas gasosas.

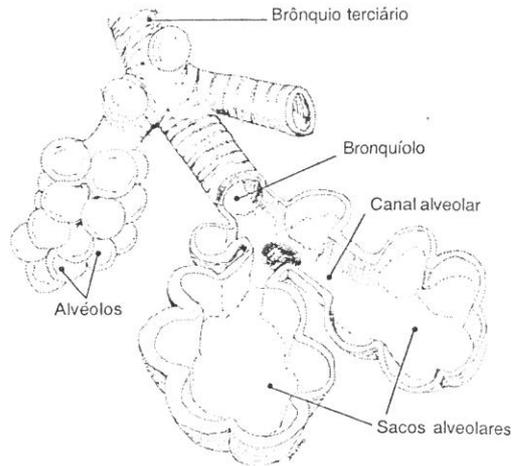


Figura 5.4 – Zona de trocas gasosas. Bronquíolos respiratórios, ducto alveolar e alvéolos.

No adulto jovem estima-se em cerca de 300 milhões o número de alvéolos existentes nos pulmões. A parede alveolar é composta por uma única camada de células de tecido epitelial escamoso (células do tipo I), apoiadas numa membrana basal como acontece na maioria dos epitélios. A face externa dos alvéolos apresenta fibras elásticas, sendo recoberta por um aglomerado de capilares pulmonares. Ao conjunto das paredes alveolar e capilar e respectivas membranas basais, separadas por fluído intersticial, atribui-se a designação de *membrana respiratória*, que define a fronteira das trocas gasosas: do lado alveolar da membrana respiratória encontra-se ar e do lado capilar, sangue (Figura 5.5).

Ao constituir uma fina barreira entre o ar e o sangue, a membrana respiratória permite que as trocas gasosas se processem por simples difusão, de tal modo que o oxigénio passa dos alvéolos para o sangue e o dióxido de carbono deixa a rede sanguínea para ocupar o espaço alveolar.

No quadro 5.1 resume-se a descrição geral dos vários órgãos do aparelho respiratório e a respectiva função.

Órgão
Fossas Nasais
Faringe
Laringe
Traqueia
Árvore Brônquica
Alvéolos
Pulmões
Pleuras

5.2 VENTILAÇÃO

5.2.1 Física da ve

Pressões na cavi

A ventilação pulmonar é constituída por duas fases que se apresentam, uma durante a inspiração e outra durante a expiração. Na inspiração ocorre a entrada de ar no aparelho respiratório para o exterior.



Quadro 5.1 – Descrição e função dos órgãos do aparelho respiratório.

Órgão	Descrição	Função
Fossas Nasais	No tecto da cavidade nasal encontra-se o epitélio olfactivo que contém os receptores do olfacto.	Produção de muco; Aquecimento e filtração do ar; Compartimento de ressonância, útil na amplificação da voz; Sensação do olfacto.
Faringe	Cavidade que estabelece a ligação entre a cavidade nasal, a laringe, a cavidade bucal e o esófago.	Local de passagem de ar e alimentos.
Laringe	Órgão constituído por nove cartilagens, que estabelece a ligação entre a faringe e a traqueia. Aloja as cordas vocais.	Previne a passagem de alimentos para a traqueia; Produção de voz.
Traqueia	Tubo flexível formado por aros cartilagíneos em forma de "C" (incompletos posteriormente), que se dirige da laringe para o mediastino, onde se divide nos dois brônquios principais.	Aquecimento e filtração do ar.
Árvore Brônquica	Conjunto de tubos localizados no interior dos pulmões que resultam das sucessivas divisões dos brônquios principais, direito e esquerdo.	Permite a passagem do ar entre a traqueia e os alvéolos; Aquecimento e filtração do ar.
Alvéolos	Compartimento microscópico localizado na extremidade distal da árvore brônquica. As suas paredes, formadas por tecido epitelial, relacionam-se com as paredes capilares, formando, em conjunto, a membrana respiratória.	Principal local de trocas gasosas.
Pulmões	Órgãos pares localizados na cavidade torácica, constituídos por tecido conjuntivo com predomínio de fibras elásticas. Alojamos no seu interior a árvore brônquica e os alvéolos.	Alojam a árvore brônquica e todas as estruturas implicadas nas trocas gasosas.
Pleuras	Membranas serosas formadas por dois folhetos: parietal e visceral. O primeiro adere à grelha costal e diafragma e, o segundo, adere à face externa dos pulmões.	Compartimentalizam a cavidade torácica; Produzem o fluido pleural; Asseguram a continuidade dos movimentos da grelha costal e a expansão pulmonar.

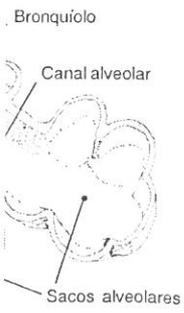
terciário

Bronquíolo

Canal alveolar

Sacos alveolares

osas. Bronquíolos e alvéolos.



se em cerca de

véolos existentes

olar é composta

células de tecido

do tipo I), apoia-

como acontece

face externa dos

elásticas, sendo

ado de capilares

paredes alveolar

mbranas basais,

icial, atribui-se a

respiratória, que

gasosas: do lado

ratória encontra-

ue (Figura 5.5).

arreda entre o ar

spiratória permite

ocessem por sim-

e o oxigénio pas-

ue e o dióxido de

ínea para ocupar

e a descrição ge-

aparelho respirató-

5.2 VENTILAÇÃO PULMONAR

5.2.1 Física da ventilação

Pressões na cavidade torácica

A ventilação pulmonar é uma função cíclica, constituída por duas fases, inspiração e expiração, que se apresentam, no tempo, de forma alternada. Na inspiração o ar entra nos pulmões, atravessando todas as estruturas da zona condutora do aparelho respiratório e na expiração é expulso para o exterior.

O movimento de ar entre o exterior e o interior dos pulmões é produzido por diferenças de pressão (gradiente de pressão). Sempre que a pressão do ar no exterior (pressão atmosférica) é superior à pressão do ar no interior (pressão intrapulmonar), o ar entra nos pulmões e a fase de inspiração acontece. Pelo contrário, sempre que a pressão intrapulmonar é superior à pressão atmosférica, inicia-se a expiração e o ar é expelido dos pulmões em direcção ao exterior.

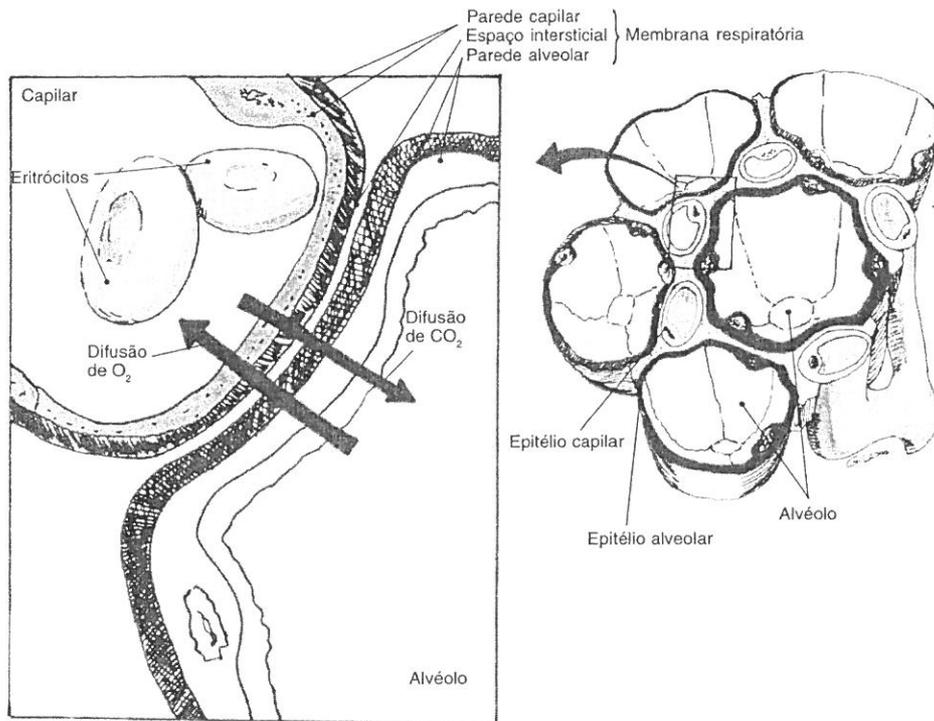


Figura 5.5 – Membrana Respiratória.

Se considerarmos que, habitualmente, a pressão atmosférica permanece constante (760 mmHg ao nível do mar), podemos concluir que, na ventilação, o movimento do ar é produzido por variações da pressão intrapulmonar que surgem associadas às variações do volume pulmonar. É conhecida a relação inversa entre a pressão desenvolvida por um determinado gás e o volume por ele ocupado (Lei de Boyle). Assim, na inspiração, a descida da pressão intrapulmonar é induzida pelo aumento do volume dos pulmões, enquanto que, na expiração, a subida da pressão intrapulmonar é desencadeada pela redução do volume pulmonar (Figura 5.6).

As alterações do volume pulmonar não são, no entanto, produzidas pelos próprios pulmões, dado serem estes órgãos passivos sem qualquer capacidade de alterar o seu estado de repouso. As alterações são, antes, o resultado de variações do volume da caixa torácica, produzidas por músculos esqueléticos, que se transmitem aos pulmões devido à íntima união destes órgãos com a grelha costal através das pleuras.

Como vimos anteriormente, os pulmões encontram-se separados da grelha costal pela cavidade pleural, totalmente preenchida pelo líquido pleural. Este líquido, produzido pelas pleuras cria uma tensão superficial que dificulta a separação dos dois folhetos pleurais entre si. Desta forma, os pulmões são mantidos em contacto com o tórax, de igual modo que dois vidros húmidos são mantidos aderentes um contra o outro.

O líquido pleural contribui ainda para a manutenção de uma pressão intrapleural sempre abaixo da pressão atmosférica. Com efeito, em repouso (final da expiração e início da inspiração), a acção da força de retracção elástica do parênquima pulmonar tende a afastar os pulmões do contacto com a grelha costal o que origina uma pressão intrapleural de cerca de 757 mmHg. Na inspiração, o aumento do volume torácico e a expansão pulmonar, por um lado, e a acção da força de retracção elástica do parênquima pulmonar, por outro, criam, ao nível dos folhetos pleurais, a tendência para o seu

afastamento e intrapleural para a pressão intrapleural em repouso e o efeito de retracção torácica.



Figura 5.6 – A

Ventilação e pressão dos pulmões

A inspiração dos pulmões se expande para entrar. Esta pressão designada por e mite explicar, e.g são de apenas 1 eupneica (respirante para ench 500 ml de ar. Em se que para encl o mesmo volume de pressão de pe

Mas não só n: físicas do tecido tantes. Na expir: pulmões é o rest



afastamento mútuo, o que faz baixar a pressão intrapleurar para 755 mmHg. Durante a expiração, a pressão intrapleurar tende a aproximar-se do valor em repouso, o que reflecte a acção da força de retracção elástica do parênquima pulmonar e o efeito da redução do volume da caixa torácica.

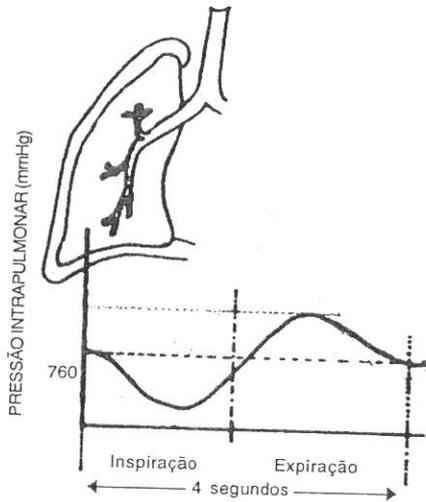


Figura 5.6 – A pressão intrapulmonar no ciclo respiratório.

Ventilação e propriedades físicas dos pulmões

A inspiração só é possível porque os pulmões se expandem, cedendo à pressão do ar a entrar. Esta propriedade física dos pulmões, designada por extensibilidade pulmonar permite explicar, e.g., como um gradiente de pressão de apenas 1 mmHg, durante a inspiração eupneica (respiração em repouso), seja suficiente para encher os pulmões com cerca de 500 ml de ar. Em termos comparativos, refira-se que para encher um balão de criança com o mesmo volume é necessário um gradiente de pressão de perto de 200 mmHg.

Mas não só na inspiração as propriedades físicas do tecido pulmonar se revelam importantes. Na expiração, a expulsão do ar dos pulmões é o resultado da acção de duas for-

ças passivas: a força de retracção elástica do parênquima pulmonar e a força produzida pela tensão superficial alveolar (ver caixa). Estas forças tendem a afastar os pulmões (folheto visceral) da caixa torácica (folheto parietal) e a produzir o colapso dos pulmões e dos alvéolos.

Tensão superficial alveolar

Os pulmões secretam e absorvem fluído, de tal modo que o resultado final é a manutenção de uma fina camada de fluído na superfície interior dos alvéolos. Este fluído alveolar tem uma determinada tensão superficial explicada pelo facto das moléculas de água que estão à superfície terem maior atracção pelas restantes moléculas de água do que pelas moléculas de ar. Quando esta tensão superficial se exerce sobre uma superfície curva como a das paredes dos alvéolos, produz-se uma força concêntrica (pressão) que tende para o colapso do próprio alvéolo. De acordo com a lei de DePlace, a pressão (P) criada é proporcional à tensão superficial (T) e inversamente proporcional ao raio de curvatura (r) dos alvéolos:

$$P = 2 \times T / r$$

A aplicação da lei de DePlace leva-nos a concluir que, para uma mesma tensão superficial, a pressão (P) é maior nos alvéolos pequenos do que nos alvéolos maiores. Contudo, um componente do fluído alveolar assegura que nos nossos pulmões a tensão superficial seja ajustada às dimensões dos alvéolos. Esse componente é um fosfolípido (dipalmitol de lecitina) conhecido sob a designação de *surfactante* (contração de "Surface Active Agent") e que funciona como redutor da tensão superficial alveolar.

Durante a expiração os alvéolos diminuem de dimensão. À medida que o raio de curvatura se reduz, as moléculas de surfactante concentram-se e intervêm mais activamente na redução da tensão superficial criada pelo fluído alveolar. A acção do surfactante é, assim, no sentido de impedir o colapso dos alvéolos, durante a expiração, facilitando o seu preenchimento durante a inspiração.



Ventilação e resistência das vias aéreas à passagem do ar

O espaço alveolar está em constante contacto com o ar atmosférico. No entanto, a pressão do ar alveolar é diferente da pressão do ar atmosférico, nomeadamente em repouso (final da expiração e início da inspiração), o que reflecte de certa forma a resistência que as vias aéreas oferecem à passagem do ar. Esta resistência é inversamente proporcional à área de secção transversal total dos tubos. Os brônquios, apesar de serem os tubos com a menor área de secção transversal individual não são, no entanto, o local de maior resistência. O seu elevado número faz aumentar a área de secção transversal total o que reduz a resistência que estes tubos oferecem à passagem do ar. Os brônquios de calibre médio, devido ao seu reduzido número, são os que oferecem a maior resistência à passagem do ar.

A resistência das vias aéreas é variável ao longo do ciclo respiratório, reduzindo-se na inspiração e aumentando na expiração.

5.2.2 Mecânica Respiratória

Inspiração

A entrada de ar, na inspiração, é o resultado da expansão dos pulmões, produzida pelo aumento do volume torácico que cria um gradiente de pressão entre o interior (pressão intrapulmonar) e o exterior dos pulmões (pressão atmosférica). O aumento do volume torácico é produzido por um conjunto de músculos com acção na grelha costal, colectivamente designados por músculos inspiradores.

O diafragma é o principal músculo inspirador, sendo responsável pelas maiores variações nos diâmetros vertical, horizontal e antero-posterior da caixa torácica, que têm lugar durante a inspiração. Na respiração eupneica distingue-se, ainda, a acção dos músculos escalenos e acessoriamente dos músculos intercostais externos. Estes múscu-

los elevam as costelas produzindo o aumento do diâmetro transversal da caixa torácica.

Na inspiração forçada a acção do diafragma é potencializada por outros músculos inspiradores: o pequeno peitoral e o esternocleidomastoideo. Em conjunto, estes músculos elevam a grelha costal proporcionando ponto fixo aos músculos intercostais externos (Quadro 5.2).

Mecanismo do diafragma

O diafragma forma uma cúpula músculo-tendinosa que separa as cavidades abdominal e torácica. Na sua constituição distingue-se uma porção tendinosa central, o *centro frénico*, e uma porção muscular disposta perifericamente.

A acção do diafragma pode dividir-se em duas fases: num primeiro tempo, a coluna lombar e as últimas costelas são usados como ponto fixo e a contracção da porção muscular periférica faz baixar o centro frénico; num segundo tempo, o próprio centro frénico apoiado nas vísceras abdominais e suportado pela tensão de elementos do mediastino, oferece ponto fixo à acção dos feixes costais da porção muscular do diafragma, que produzem a rotação das últimas seis costelas. Este movimento de rotação acontece nas articulações costo-vertebrais sendo no sentido contrário ao da curvatura de torção do corpo das costelas. Em consequência, a extremidade anterior das costelas eleva-se, o que faz aumentar a distância horizontal entre as seis últimas costelas direitas e as seis últimas costelas esquerdas, medida ao nível do corpo da costela. O resultado final é o aumento do diâmetro vertical da caixa torácica no final do primeiro tempo de contracção do diafragma e o aumento dos diâmetros transversal e antero-posterior, no final do segundo tempo.

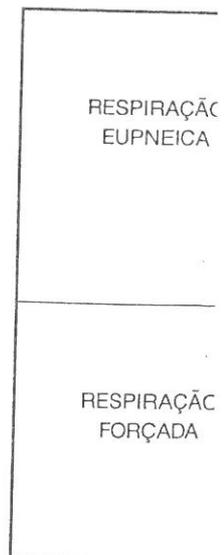
Expiração

A expiração eupneica é um fenómeno passivo desencadeado a partir do relaxamento dos

músculos insp são do ar dos pressão intrapu pela expiração ca do parênq colapsar os pu alveolar, cuja a dos alvéolos.

Na expiração forçada é potenci conjunto de m internos) e abd do abdómen), músculos expi acção na cavid volume (Quadrc ulos intercostai: to da grelha cc antero-posterior os músculos d abdómen provox dominais (reduç ção dos músculo são intrapulmon

Quac





indo o aumento
xa torácica.
ção do diafrag-
tros músculos
ral e o esterno-
, estes múscu-
proporcionando
ostais externos

músculos inspiradores de que resulta a expulsão do ar dos pulmões devido ao aumento da pressão intrapulmonar. As forças responsáveis pela expiração são a força de retracção elástica do parênquima pulmonar, que tende a colapsar os pulmões, e a tensão superficial alveolar, cuja acção é no sentido do colapso dos alvéolos.

Na expiração forçada, a acção daquelas forças é potencializada pela intervenção de um conjunto de músculos torácicos (intercostais internos) e abdominais (parede antero-lateral do abdómen), colectivamente designados músculos expiradores, que exercem a sua acção na cavidade torácica reduzindo o seu volume (Quadro 5.2). A contracção dos músculos intercostais internos produz o abaixamento da grelha costal (redução dos diâmetros antero-posterior e transversal), enquanto que os músculos da parede antero-lateral do abdómen provocam a subida das vísceras abdominais (redução do diâmetro vertical). A acção dos músculos expiradores faz subir a pressão intrapulmonar em cerca de 20-30 mmHg,

o que provoca a expulsão de grande quantidade de ar do interior dos pulmões.

5.2.3 Espirometria, volumes e capacidades pulmonares

A espirometria refere-se à metodologia de medida e registo dos volumes de ar que entram e saem dos pulmões durante a ventilação, os *volumes pulmonares*. Utiliza como instrumento de medida o espirómetro constituído por um depósito de água e uma campânula invertida (Figura 5.7) que tem acesso ao exterior através de um tubo que se liga à boca do sujeito em avaliação.

Constrói-se, assim, um sistema fechado em que o ar é injectado na campânula, deslocando-a para cima quando o sujeito expira e para baixo quando o sujeito inspira. Os movimentos ascendentes e descendentes da campânula são registado em papel, gerando um gráfico dos volumes pulmonares, em função do tempo: o espirograma. Apesar de actualmente serem utilizados espirómetros mais sofisticados, alguns

Quadro 5.2 – Resumo dos principais eventos associados à inspiração e expiração, na respiração eupneica e respiração forçada.

	INSPIRAÇÃO	EXPIRAÇÃO
RESPIRAÇÃO EUPNEICA	<ol style="list-style-type: none"> 1º Contracção do diafragma e músculos escalenos; 2º Aumento dos volumes torácico e pulmonar; 3º Redução da pressão intrapulmonar cerca de 3 mmHg abaixo da pressão atmosférica. 	<ol style="list-style-type: none"> 1º Relaxamento do diafragma e músculos escalenos; 2º Retracção elástica produzida pelo parênquima pulmonar; 3º Redução dos volumes torácico e pulmonar; 4º Aumento da pressão intrapulmonar cerca de 3 mmHg acima da pressão atmosférica.
RESPIRAÇÃO FORÇADA	<ol style="list-style-type: none"> 1º Contracção adicional dos músculos acessórios da inspiração (escalenos, pequeno peitoral, esternocleidomastoideo); 2º Aumento dos volumes torácico e pulmonar; 3º Redução da pressão intrapulmonar cerca de 20 mmHg abaixo da pressão atmosférica. 	<ol style="list-style-type: none"> 1º Acção adicional dos músculos intercostais internos e músculos da parede antero-lateral do abdómen; 2º Aumento da pressão intrapulmonar cerca de 30 mmHg acima da pressão atmosférica.



5.3 TROCAS GASOSAS E TRANSPORTE DE GASES RESPIRATÓRIOS

Designa-se por trocas gasosas todo o processo associado ao movimento das moléculas dos gases respiratórios (O_2 e CO_2) que tem lugar nos pulmões, entre os alvéolos e os capilares pulmonares, e nos tecidos, entre os capilares sistémicos e as células. As trocas que ocorrem nos pulmões são também designadas por respiração externa ou hematose, enquanto as trocas que acontecem ao nível dos tecidos recebem a designação alternativa de respiração interna. Incluem-se igualmente na respiração interna todas as reacções associadas à utilização do O_2 e produção de CO_2 e que têm lugar no interior das células.

Na respiração externa os gases respiratórios percorrem uma curta distância, correspondente à espessura da membrana respiratória, e o resultado final é no sentido de aumentar a concentração de O_2 no sangue e diminuir a de CO_2 . Pelo contrário, na respiração interna a concentração de CO_2 no sangue aumenta e a de O_2 diminui.

Tanto na respiração externa como na respiração interna, os processos físicos envolvidos são idênticos, pelo que serão descritos em simultâneo. Contudo, é necessário ter em consideração que entre os dois locais de trocas, os gases respiratórios são transportados pelo sangue, pelo que faremos a descrição das respectivas formas de transporte, mais adiante neste capítulo.

Por outro lado, o entendimento de todo o processo de trocas gasosas requer conhecimento acerca das principais propriedades dos gases, nomeadamente daquelas que estão associadas ao comportamento dos gases quando colocados em contacto com líquidos. Assim, iniciaremos a descrição do processo de trocas gasosas precisamente pela análise das propriedades básicas dos gases.

5.3.1 Propriedades básicas dos gases

Pressão parcial e gradiente de pressão parcial

O ar que respiramos é uma mistura de gases, da qual fazem parte os gases respiratórios oxigénio (O_2) e dióxido de carbono (CO_2) e outros gases como o azoto (N_2) e o vapor de água (H_2O). De acordo com a lei de Dalton, a pressão total exercida por uma mistura de gases é igual ao somatório da pressão exercida por cada um dos gases da mistura (pressão parcial do gás), sendo esta equivalente à percentagem do volume total que cada um dos gases ocupa na mistura. Assim, por exemplo, ao saber que o oxigénio ocupa cerca de 21% do ar que respiramos (Quadro 3) e que a pressão total da mistura (ar atmosférico) é de 760 mmHg (pressão atmosférica ao nível do mar), é possível calcular a pressão parcial de O_2 , multiplicando o valor de pressão total pela percentagem de O_2 na mistura ($0.21 \times 760 \text{ mmHg} = 159 \text{ mmHg}$). Dizemos, então, que a pressão parcial de O_2 (abreviadamente P_{O_2}) no ar atmosférico é de 159 mmHg.

No quadro 3 apresenta-se a composição do ar atmosférico comparativamente à composição do ar alveolar. Repare-se que o oxigénio e o azoto contribuem, em conjunto, com cerca de 99% para a pressão total do ar atmosférico. Note-se, ainda, que as pressões parciais de O_2 e de N_2 são inferiores no ar alveolar comparativamente à do ar atmosférico e que a PCO_2 e de vapor de água são inferiores no ar atmosférico. As diferenças na concentração de água no ar alveolar reflectem, de algum modo, a função das vias aéreas, no que se refere ao humedecimento do ar que entra para os pulmões.

O movimento dos gases respiratórios ao nível dos pulmões e dos tecidos faz-se por difusão dos locais de maior concentração para os de menor concentração. Dado que a concentração do gás, numa mistura de gases, é equivalente à sua pressão parcial, podemos

Capacidade
pulmonar Total

6000 ml

ml - 150 ml) x 12],
de somente 2400

ção é mais eficaz
a parte do esfor-
o respiratório do
deslocar ar en-
; sem que isso
ância da troca de

mente, que o au-
do (profundidade
para a ventilação
frequência respira-
e a respiração é
de de ar disponí-
ível dos pulmões
uz-se aproximam-
espaço morto e o
a ser zero.



Quadro 5.3 – Quadro comparativo das pressões parciais dos gases no ar atmosférico e ar alveolar (adaptado de Fox, 1996).

	Ar atmosférico (ao nível do mar)		Ar alveolar (ao nível do mar)	
	Porcentagem na mistura (aprox.)	Pressão Parcial (mmHg)	Porcentagem na mistura (aprox.)	Pressão Parcial (mmHg)
N ₂	78.6	597	74.9	569
O ₂	20.9	159	13.7	104
CO ₂	0.04	0.3	5.2	40
Vapor H ₂ O	0.46	3.7	6.2	47
TOTAL	100.0%	760	100.0%	760

afirmar que o movimento dos gases acontece dos locais de maior pressão parcial para os de menor pressão parcial. A quantidade e velocidade de difusão dependem, assim, da diferença de pressão parcial do gás entre os dois locais de troca. Esta diferença de pressão é designada por *gradiente de pressão parcial*.

Difusão dos gases através dos líquidos

Os gases respiratórios difundem-se de um meio gasoso (os alvéolos) para um meio aquoso (o sangue) e vice-versa. Assim, é necessário considerar o comportamento dos gases quando colocados em contacto com um fluído.

A facilidade com que um gás se difunde através de um líquido é expressa pelo *coeficiente de difusão*. Este parâmetro é proporcional ao grau de solubilidade dos gases respiratórios e inversamente proporcional ao peso molecular do gás. A solubilidade, por sua vez, pode definir-se como a *"habilidade"* das moléculas do gás em se misturarem com as moléculas do fluído. De acordo com a lei de Henry, sempre que uma mistura de gases entra em contacto com um fluído e é atingido o equilíbrio, isso significa que a quantidade de gás dissolvida no fluído atingiu o seu valor máximo. Dito de outro modo, cada gás da mistura dissolver-se-á no fluído na proporção do respectivo gradiente de pressão parcial, até ser atingido o equilíbrio. Assim, quanto maior for o gradiente de pressão parcial maior será a quantidade de gás que se difunde.

Os vários gases que compõem o ar, apresentam diferentes coeficientes de difusão. O CO₂ é o gás com maior coeficiente, apresentando uma solubilidade cerca de vinte vezes superior à do oxigénio. Assim, para um mesmo gradiente de pressão parcial, a quantidade de CO₂ que se dissolve no plasma é 20 vezes superior à que é possível dissolver de O₂. O azoto, por seu lado, é quase insolúvel no plasma sanguíneo. A sua solubilidade é metade da do oxigénio, o que determina que este gás, apesar de ser o que apresenta maior pressão parcial no ar atmosférico e alveolar, esteja ausente nas trocas gasosas realizadas ao nível dos pulmões.

A solubilidade dos gases é variável em função da temperatura do fluído. Assim, quando a temperatura aumenta a solubilidade diminui, aumentando sempre que a temperatura do fluído diminui.

5.3.2 Trocas gasosas ao nível da membrana respiratória (Hematose)

O coeficiente de difusão dos gases respiratórios e a temperatura do plasma sanguíneo são, num determinado instante, constantes, pelo que a quantidade de O₂ e CO₂ que participa nas trocas gasosas depende unicamente do gradiente de pressão parcial e da distância que o gás tem de percorrer entre os locais de troca. Na hematose, o gradiente de pressão parcial estabelece-se ao nível da membrana respiratória entre o ar alveolar e o sangue dos capilares pulmonares.

A Po₂ no membrana r
cerca de 10
ente de pres
a difusão rá
sangue da r
taneamente,
tido oposto a
espaço alve
que chega ac
ximadamente
existentes n
ente de Pco₂
entanto, que
vessa a mem
à quantidade
olos para o
facto do coef
ca de 20 veze

Em repou
de 0.75 segu
brana respirat
ca de 0,25 seq
completar as l
brana respirat
ponde a perto
o sangue con
5.10). Durante
CO₂ saiem d
pulmonares e
para o sangue
hematose pos
tacto do sang
possa ser redu
tece durante c
que isso preju
sosas.

Factores que

O gradiente
factor implicac
dos alvéolos. C
depende de fa
respiratória (e
funcional) e à f



Ar alveolar
do mar
Pressão Parcial (mmHg)
569
104
40
47
760

A P_{O_2} no sangue antes de contactar com a membrana respiratória é de 40 mmHg para cerca de 100 mmHg no ar alveolar. O gradiente de pressão parcial de 60 mmHg permite a difusão rápida do O_2 do ar alveolar para o sangue da rede sanguínea pulmonar. Simultaneamente, o CO_2 faz o movimento no sentido oposto ao do O_2 , i.e., do sangue para o espaço alveolar. A P_{CO_2} no sangue venoso que chega aos capilares pulmonares é de aproximadamente 45 mmHg, contra os 40 mmHg existentes no ar alveolar. O reduzido gradiente de P_{CO_2} (apenas 5 mmHg) permite, no entanto, que a quantidade de CO_2 que atravessa a membrana respiratória seja idêntica à quantidade de O_2 que se difunde dos alvéolos para o sangue. Tal fica a dever-se ao facto do coeficiente de difusão do CO_2 ser cerca de 20 vezes superior ao do O_2 .

Em repouso, o sangue permanece perto de 0.75 segundos em contacto com a membrana respiratória. Contudo, estima-se em cerca de 0,25 segundos o tempo necessário para completar as trocas gasosas ao nível da membrana respiratória, em repouso, o que corresponde a perto de um terço do tempo total que o sangue contacta com a membrana (Figura 5.10). Durante este período cerca de 3.5 ml de CO_2 saem do sangue para os capilares pulmonares e 4 ml de O_2 passam dos alvéolos para o sangue. A rapidez com que acontece a hematose possibilita que o tempo total de contacto do sangue com a membrana respiratória possa ser reduzido até dois terços, como acontece durante o exercício físico vigoroso, sem que isso prejudique a eficácia das trocas gasosas.

Factores que condicionam a hematose

O gradiente de pressão parcial é o principal factor implicado nas trocas gasosas ao nível dos alvéolos. Contudo, a eficácia da hematose depende de factores associados à membrana respiratória (espessura e área de superfície funcional) e à forma como os gases respirató-

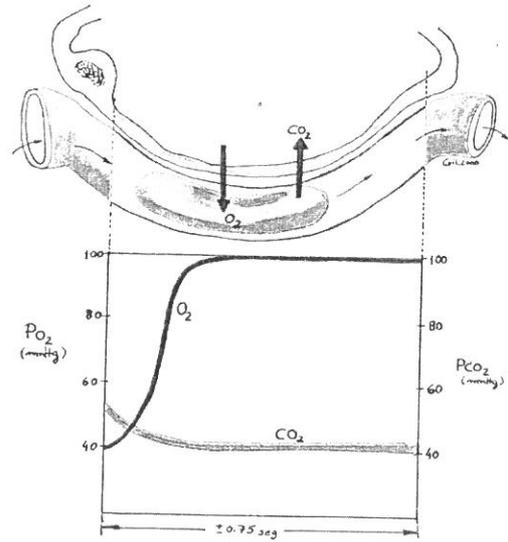


Figura 5.10 – Tempo de contacto do sangue com a membrana respiratória e curvas de PO_2 e PCO_2 .

rios se difundem através dela, assim como da relação entre a quantidade de ar que entra e sai dos pulmões (ventilação) e do fluxo sanguíneo (perfusão) que contacta com os alvéolos.

Espessura da membrana respiratória: A membrana respiratória tem, em média, uma espessura de 0,5 mm. Mas, em algumas patologias respiratórias este valor pode apresentar-se aumentado, o que tem consequências negativas na eficácia das trocas gasosas ao nível dos pulmões, uma vez que o índice de difusão dos gases respiratórios diminui sempre que a espessura da membrana respiratória aumenta.

Coefficiente de difusão: Como vimos anteriormente, o CO_2 tem um coeficiente de difusão na água (plasma) 20 vezes superior ao coeficiente do O_2 . Isto significa que a difusão do CO_2 através da membrana respiratória é mais rápida que a de O_2 . Qualquer alteração estrutural da membrana respiratória tem maiores consequências no movimento de O_2 para o sangue do que na difusão de CO_2 para os alvéolos.

Área da superfície da membrana respiratória: A superfície alveolar total (área total das paredes dos alvéolos) no sujeito normal é mui-



to elevada, aproximando-se dos 145m². Contudo, somente cerca de metade é coberta pelos capilares pulmonares, o que reduz para cerca de 72 m² a área disponível para as trocas gasosas (superfície funcional). Esta área é equivalente à de um campo de ténis.

Num determinado período de tempo, a quantidade de gás que é possível trocar entre os alvéolos e os capilares pulmonares é tanto maior quanto maior for a superfície da membrana respiratória. A redução da superfície funcional interfere significativamente na quantidade de gases que é possível trocar através da membrana respiratória.

Relação ventilação-perfusão: A troca de O₂ e CO₂ entre os alvéolos e a rede sanguínea pulmonar é a principal função dos pulmões. A quantidade de gases respiratórios que participa nas trocas ao nível dos pulmões depende da quantidade de ar que chega aos alvéolos, por unidade de tempo (ventilação alveolar minuto) e da quantidade de sangue que circula nos capilares pulmonares, igualmente por unidade de tempo (perfusão). Em repouso e em condições normais, a relação ventilação-perfusão ao nível da membrana respiratória permite trocar quantidades de O₂ e de CO₂ compatíveis com as necessidades metabólicas do organismo. Tal é possível, devido à acção das arteríolas pulmonares no sentido do ajustamento do fluxo sanguíneo pulmonar ao volume de ar ventilado para os alvéolos. Com efeito, a quebra da P_{O₂} e a elevação da P_{CO₂} constitui o estímulo para a constricção das arteríolas pulmonares e a conseqüente redução do fluxo sanguíneo para os capilares dos alvéolos não ventilados. Pelo contrário, o aumento da P_{O₂} e diminuição da P_{CO₂} induz a vasodilatação das arteríolas pulmonares e o relaxamento dos esfíncteres pré-capilares.

5.3.3 Trocas gasosas ao nível dos tecidos

Na respiração interna, o gradiente de pressão parcial dos gases respiratórios é o principal promotor das trocas gasosas, tal como

acontece na respiração externa. Em condições normais, a P_{O₂} nos tecidos é sempre inferior à P_{O₂} do sangue arterial. Nos tecidos é, em média, de 40 mmHg e no sangue arterial de 104 mmHg. O gradiente de pressão de 64 mmHg é, assim, no sentido de produzir a difusão rápida do O₂ do sangue para os tecidos. Por sua vez, a P_{CO₂} nos tecidos é de 45 mmHg contra 40 mmHg do sangue o que faz deslocar o CO₂ das células para o sangue dos capilares sistémicos. Deste modo, o sangue venoso que abandona os tecidos possui uma P_{O₂} de 40 mmHg e uma P_{CO₂} de 45 mmHg (Figura 5.11).

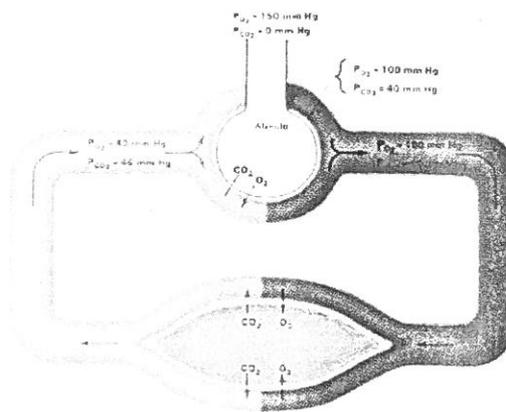


Figura 5.11 – Pressão parcial dos gases respiratórios na respiração externa e interna.

5.3.4. Transporte de oxigénio

O oxigénio é transportado no sangue sob duas formas distintas: 1) em combinação com a hemoglobina no interior dos eritrócitos e 2) dissolvido no plasma sanguíneo.

A quantidade de O₂ dissolvida no plasma é muito pequena, devido à reduzida solubilidade deste gás na água. Por isso, cerca de 97% do O₂ é transportado nos glóbulos vermelhos em combinação com a hemoglobina. Deste modo, a concentração de hemoglobina no sangue condiciona a capacidade de transporte de O₂ e a distribuição deste gás aos tecidos.

A hemoglobina é composta por quatro cadeias polipeptídicas e duas cadeias heme, cada uma com uma molécula de heme. Cada molécula de hemoglobina contém quatro moléculas de heme.

A hemoglobina cuja produção é estimulada pelo eritropoetina produzida nos rins. A produção de eritropoetina é estimulada por dois estímulos: 1) o nível dos rins de androgénios no sangue constitui a razão dos componentes sanguíneos de 100 ml superior mulher.

A combinação de um fenómeno reversível com a hemoglobina (HbO₂), num processo de associação, e a dissociação de O₂ se dissocia de desoxihemoglobina, produzida através de reacção de dissociação.

Na reacção de dissociação de polímeros de hemoglobina cooperativa, que a ligação à primeira molécula de O₂ facilita a ligação à molécula seguinte, a ligação à primeira molécula de O₂ é extremamente fraca. Os efeitos são altamente cooperativos e a ligação é tridimensional da molécula desencadeada inicialmente à primeira molécula de O₂. A hemoglobina, diz-se saturada, uma vez que não pode aceitar novas uniões.



Em condições normais, a pressão parcial de P_{O_2} é, em média, inferior à pressão arterial de 104 mmHg. A difusão rápida de O_2 contra um gradiente de 64 mmHg nos capilares venosos que recebem sangue de P_{O_2} de 40 mmHg (Figura 5.11).

A hemoglobina é uma molécula pigmentada composta por uma proteína, a globina, que contém quatro cadeias peptídicas (duas cadeias α e duas β). Cada uma das cadeias peptídicas une-se a um íon de ferro, formando o grupo *heme*, o qual pode combinar-se com uma molécula de O_2 . Assim, por cada molécula de hemoglobina é possível transportar quatro moléculas de O_2 .

A hemoglobina encontra-se nos eritrócitos cuja produção na medula vermelha dos ossos é estimulada pela hormona eritropoietina, produzida nos rins. Por sua vez, a libertação de eritropoietina para o sangue é determinada por dois estímulos: 1) o défice de O_2 (hipóxia) ao nível dos rins e, 2) a concentração de androgénios no sangue. Este último estímulo constitui a razão pela qual a quantidade de componentes sanguíneos é cerca de 1-2 g / 100 ml superior no homem relativamente à mulher.

A combinação do O_2 com a hemoglobina é um fenómeno reversível. Nos pulmões o O_2 liga-se à hemoglobina para formar *oxihemoglobina* (HbO_2), num processo designado por *reação de associação*, enquanto que, nos tecidos, o O_2 se dissocia da hemoglobina, formando-se *desoxihemoglobina* (HHb) ou *hemoglobina reduzida* através de um processo conhecido por *reação de dissociação*.

Na reação de associação, as quatro cadeias de polipeptídeos da molécula de hemoglobina cooperam entre si de tal modo, que a ligação à primeira molécula de O_2 facilita a ligação à molécula seguinte. Este efeito é crescente para cada uma das moléculas de O_2 , pelo que a união da quarta molécula de O_2 é extremamente facilitada. Na origem deste efeito estão alterações na configuração tridimensional da molécula de hemoglobina desencadeadas imediatamente após a união à primeira molécula de O_2 . Quando quatro moléculas de O_2 se unem à molécula de hemoglobina, diz-se que a hemoglobina está saturada, uma vez que não é possível estabelecer novas uniões com moléculas de O_2 .

O transporte de O_2 pela hemoglobina

A quantidade de O_2 que se liga à hemoglobina está altamente relacionada com a pressão parcial de O_2 do sangue, numa relação que não é linear, como se pode observar na figura 5.12 que representa a curva de dissociação da oxihemoglobina (percentagem de hemoglobina saturada) em relação à P_{O_2} .

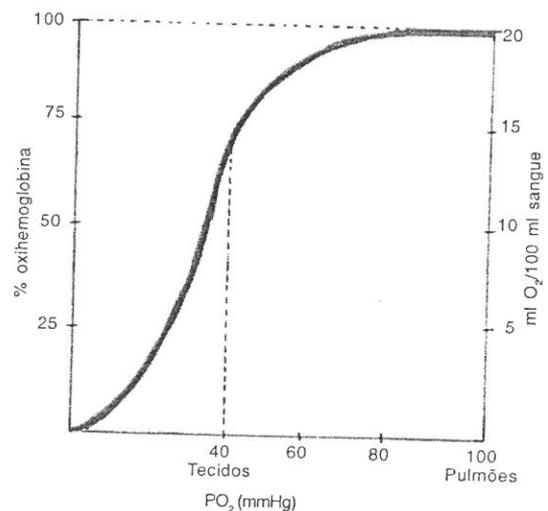


Figura 5.12 – Curva de dissociação da oxihemoglobina.

Quando a P_{O_2} é elevada a reação de associação é facilitada e a de dissociação é inibida. Na figura 5.12 é possível verificar que praticamente toda a hemoglobina fica saturada para valores de P_{O_2} acima dos 70 mmHg. Nos pulmões, em que a P_{O_2} do ar alveolar é de cerca de 104 mmHg, quase todas as moléculas de hemoglobina reduzida, existentes no sangue venoso que chega aos pulmões são convertidas em oxihemoglobina. O sangue sai, assim, dos pulmões com uma P_{O_2} de 100 mmHg e uma percentagem de hemoglobina saturada de 97%. Isto equivale a dizer que 97% da hemoglobina existente no sangue arterial sistémico se encontra sob a forma de oxihemoglobina.



Nos capilares sistémicos, pelo contrário, a reduzida P_{O_2} dos tecidos facilita a reacção de dissociação e inibe a de associação, o que condiciona a libertação de O_2 que se encontra unido à hemoglobina e a sua distribuição pelas células. O sangue venoso que abandona os tecidos possui, assim, uma P_{O_2} de 40 mmHg e uma percentagem de oxihemoglobina que se aproxima dos 75%. Repare-se que a P_{O_2} do sangue venoso (40 mmHg) é consideravelmente inferior à P_{O_2} do sangue arterial (104 mmHg). No entanto, a percentagem de hemoglobina saturada existente no sangue venoso é bastante elevada ($\pm 75\%$), o que reflecte a reduzida quantidade de O_2 que é distribuída aos tecidos em repouso (± 5 ml de O_2 por cada 100 ml de sangue). Por outro lado, a existência de uma elevada percentagem de hemoglobina saturada, no sangue que abandona os tecidos, determina a existência de uma importante reserva de O_2 no sangue venoso ("reserva venosa"), que permite manter o funcionamento regular do encéfalo e coração, durante 5 minutos, na ausência de ventilação.

A curva de dissociação é praticamente vertical para valores de P_{O_2} abaixo dos 40 mmHg (Figura 5.12), o que corresponde à P_{O_2} do sangue venoso sistémico. Esta característica determina que, por exemplo, uma ligeira descida de 10 mmHg na P_{O_2} no sangue venoso (de 40 mmHg para 30 mmHg) seja suficiente para induzir uma queda da percentagem de oxihemoglobina, de 75% para 58%. Note-se que, sempre que a percentagem de oxihemoglobina (hemoglobina saturada) diminui no sangue venoso, isso corresponde a um aumento da quantidade de O_2 distribuída aos tecidos. Assim, quando a P_{O_2} ao nível dos tecidos desce abaixo dos 40 mmHg, como acontece durante o exercício físico intenso, a reacção de dissociação da hemoglobina fica facilitada. A percentagem de oxihemoglobina no sangue venoso baixa e a quantidade de O_2 que se dissocia da hemoglobina e se difunde para as células, aumenta. Todo este ajustamen-

to é realizado sem que o débito cardíaco ou a frequência respiratória se alterem, utilizando como fonte de O_2 unicamente a reserva venosa.

Efeitos do pH e da temperatura do sangue no transporte de O_2

A capacidade da molécula de hemoglobina fixar O_2 define a sua afinidade. Assim, uma elevada afinidade facilita a reacção de associação e inibe a de dissociação, enquanto que uma fraca afinidade facilita a reacção de dissociação e inibe a de associação. Em condições normais a afinidade da hemoglobina é muito elevada, de tal modo que cerca de 97% da hemoglobina contida no sangue que abandona os pulmões (sangue arterial), se encontra sob a forma de oxihemoglobina. No entanto, esta afinidade é suficientemente fraca para permitir a reacção de dissociação ao nível dos tecidos.

A afinidade da molécula de hemoglobina ao O_2 é influenciada por vários factores, de entre os quais se destaca o pH e a temperatura do sangue. Para um pH baixo (ácido), a afinidade da hemoglobina tende a reduzir-se, enquanto que para um pH alto (alcalino), a afinidade aumenta. Recorde-se que o pH baixo é consequência do aumento da concentração de iões de hidrogénio, no sangue. A ligação destes iões com a hemoglobina, nomeadamente com a fracção proteica da molécula, produz alterações na sua configuração tridimensional que provocam a redução da capacidade da hemoglobina para se ligar com o O_2 .

O efeito do pH na afinidade da molécula de hemoglobina e as respectivas implicações ao nível da quantidade de O_2 distribuída aos tecidos é conhecido por *efeito de Bohr*. Repare-se que, sempre que a afinidade da hemoglobina diminui, tal como acontece quando o pH sanguíneo é baixo, a capacidade de fixar O_2 no sangue fica igualmente reduzida. Isto condiciona que uma maior quantidade de O_2

abandona o se
Deste modo, c
lação entre o
oxigenação de
(ácido) a qual
tecidos aumen

Por outro la
larmente sensi
sangue (P_{CO_2}):
tração de CO_2
associados ao
lular, tendem a
Transporte de c
do com o efeito
ciente para faz
 O_2 distribuída a
dade da molécul
de Bohr permit
distribuição de C
camente, nas va
lar (produção de

A temperatur
te ao do pH sobr
ras elevadas ten
hemoglobina e v
pre que a temper
quantidade de C
ção dos tecidos,
tar. Este efeito d
mente importante
O aumento da ter
bra do pH sangui
substâncias ácid
gue, condiciona u
da hemoglobina
aporte de O_2 aos
actividade. Nestas
liberta entre 75%
dos tecidos.

5.3.5 Transporte

Em repouso, a
de 200 ml de CC
corresponde à me
que é expulsa pelc



cardíaco ou a
em, utilizando
reserva veno-

ira
O₂

hemoglobina
ssim, uma ele-
io de associa-
enquanto que
a reacção de
acção. Em con-
hemoglobina é
cerca de 97%
gue que aban-
ia' encontra-
ina. No entan-
ente fraca para
ão ao nível dos

hemoglobina
s factores, de
e a temperatu-
o (ácido), a afi-
a reduzir-se,
to (alcalino), a
e que o pH bai-
da concentra-
sangue. A liga-
lobina, nomea-
da molécula,
configuração
a redução da
ara ligar com

da molécula de
implicações ao
ibuída aos tec-
Bohr. Repare-se
la hemoglobina
ando o pH san-
de fixar O₂ no
eduzida. Isto
quantidade de O₂

abandona o sangue em direcção aos tecidos. Deste modo, o efeito de Bohr estabelece a relação entre o pH do sangue e o nível de oxigenação dos tecidos: para um pH baixo (ácido) a quantidade de O₂ distribuída aos tecidos aumenta e vice-versa.

Por outro lado, o pH sanguíneo é particularmente sensível à concentração de CO₂ no sangue (P_{CO₂}): valores elevados de concentração de CO₂ no sangue, como acontecem associados ao aumento do metabolismo celular, tendem a baixar o pH (ver ponto 5.3.5 Transporte de dióxido de carbono). De acordo com o efeito de Bohr, este estímulo é suficiente para fazer aumentar a quantidade de O₂ distribuída aos tecidos, ao reduzir a afinidade da molécula de hemoglobina. O efeito de Bohr permite explicar o ajustamento da distribuição de O₂ aos tecidos com base, unicamente, nas variações do metabolismo celular (produção de CO₂).

A temperatura produz um efeito semelhante ao do pH sobre a hemoglobina: temperaturas elevadas tendem a reduzir a afinidade da hemoglobina e vice-versa. Deste modo, sempre que a temperatura do sangue aumenta, a quantidade de O₂ que é colocada à disposição dos tecidos, tende igualmente a aumentar. Este efeito da temperatura é particularmente importante durante o exercício físico. O aumento da temperatura associado à quebra do pH sanguíneo, devido à libertação de substâncias ácidas dos músculos para o sangue, condiciona uma diminuição da afinidade da hemoglobina que permite o aumento do aporte de O₂ aos músculos esqueléticos em actividade. Nestas condições, a hemoglobina liberta entre 75% a 85% de oxigénio ao nível dos tecidos.

5.3.5 Transporte de dióxido de carbono

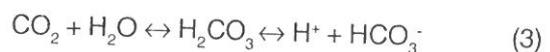
Em repouso, as células produzem cerca de 200 ml de CO₂ em cada minuto, o que corresponde à mesma quantidade deste gás que é expulsa pelos pulmões, na mesma uni-

dade de tempo. Depois de formado nas mitocôndrias, o CO₂ difunde-se rapidamente para o sangue, onde é transportado até aos capilares pulmonares para a sua eliminação na hematose e fase de expiração.

No sangue, o transporte de CO₂ é feito de três formas: 1) dissolvido no plasma; 2) ligado à hemoglobina, nos glóbulos vermelhos; e 3) no plasma, sob a forma de ião bicarbonato (HCO₃⁻). Apesar de altamente solúvel, somente cerca de 7-10% do CO₂ transportado no sangue se encontra dissolvido no plasma (Figura 5.13).

Todo o CO₂ restante difunde-se para o eritrócito onde uma parte se combina com a hemoglobina (cerca 20% a 30%) para formar a carbamino-hemoglobina (HbCO₂). Esta reacção é extremamente rápida, processando-se sem necessidade de qualquer catalisador, dado que as moléculas de CO₂ se unem directamente aos aminoácidos da proteína globina, deixando o grupo heme livre. Assim, e ao nível estritamente molecular, o transporte de CO₂ nos eritrócitos não interfere com o transporte de O₂. No entanto, o aumento da P_{O₂} do sangue tende a libertar o CO₂ da hemoglobina, num processo conhecido sob a designação de *efeito de Haldane* (ver caixa).

A maior parte do CO₂ que entra no eritrócito (60% - 70%) é convertido em ião bicarbonato (HCO₃⁻), de acordo com a reacção (3) para posteriormente ser transportado no plasma sanguíneo. A conversão em ião bicarbonato acontece no interior do eritrócito, por hidratação do CO₂ de que resulta ácido carbónico (H₂CO₃). Trata-se de uma reacção (3) extremamente lenta nos tecidos e no plasma sanguíneo mas, nos eritrócitos é acelerada pela presença do enzima *anidrase carbónica*. O passo seguinte é a dissociação do ácido carbónico nos iões bicarbonato (HCO₃⁻) e hidrogénio (H⁺). Esta reacção é espontânea, reversível e extremamente rápida (3).





Efeito de Haldane

O efeito de Haldane reflecte a capacidade da hemoglobina reduzida em transportar CO_2 e simultaneamente exercer uma acção tampão sobre o ião H^+ , ao combinar-se com o próprio ião. Quanto menor for a Po_2 e a saturação da hemoglobina, maior é a quantidade de carbo-amino-hemoglobina que é possível formar, o que faz aumentar a capacidade de transporte de CO_2 .

À medida que o CO_2 entra no sangue, a quantidade de iões H^+ que se forma nos eritrócitos aumenta. Em consequência, aumentam as ligações dos iões H^+ com a hemoglobina (reduzida), o que produz alterações na configuração tridimensional da molécula de hemoglobina, reduzindo-lhe a sua afinidade ao O_2 . Desencadeia-se, assim, o efeito de Bohr e a quantidade de O_2 que se dissocia da hemoglobina, aumenta. A percentagem de hemoglobina reduzida aumenta e as possibilidades de união ao CO_2 para formar carbo-amino-hemoglobina também aumentam.

Na circulação pulmonar o efeito de Haldane processa-se de forma inversa. Ao aumento do aporte de O_2 associa-se um aumento da expulsão de CO_2 . Assim, à medida que a hemoglobina vai ficando saturada, os iões de hidrogénio são libertados, combinando-se com os iões bicarbonato para formar CO_2 .

Os iões HCO_3^- entretanto produzidos, difundem-se do eritrócito para o plasma sanguíneo, onde são transportados até aos pulmões, enquanto que os iões H^+ produzidos se unem à hemoglobina, dando origem ao efeito de Bohr: produzem alterações na configuração tridimensional da molécula de hemoglobina, reduzindo-lhe a sua afinidade ao O_2 . Em repouso, o efeito da libertação dos iões H^+ sobre o pH sanguíneo é muito reduzido, uma vez que os iões H^+ se unem à hemoglobina. Na realidade, o pH do sangue diminui de 7.4 para 7.34 na sua passagem pelos tecidos. O aumento da concentração de iões negativos no plasma, devido à difusão dos iões HCO_3^- , é equilibrada pela difusão de iões cloro (Cl^-) do

plasma para os eritrócitos. Este movimento dos iões Cl^- é fundamental para assegurar o equilíbrio electrolítico entre o interior e o exterior do eritrócito, perturbado após a saída dos iões negativos de HCO_3^- . A troca de iões Cl^- por iões bicarbonato ao nível da membrana dos eritrócitos é designada por *desvio do cloreto* ("chloride shift").

Nos pulmões o processo de conversão acontece de forma inversa: os iões HCO_3^- regressam aos eritrócitos, onde se juntam aos iões H^+ para formar ácido carbónico que, sob a acção da anidrase carbónica, é convertido em CO_2 e água. À medida que os iões HCO_3^- e H^+ se combinam para formar ácido carbónico, os iões de Cl^- saem do eritrócito. O CO_2 formado difunde-se, depois, rapidamente do eritrócito para o plasma, de onde se difunde para o espaço alveolar, durante a hematose, de acordo com o seu gradiente de pressão parcial.

5.4 CONTROLO DA RESPIRAÇÃO

A inspiração e expiração são o resultado da contracção e relaxamento de músculos esqueléticos (músculos respiratórios) em resposta à actividade de motoneurónios localizados na medula. A actividade destes motoneurónios é regulada por dois sistemas neurogénicos distintos, mas funcionalmente sobrepostos: 1) o sistema de controlo voluntário, exercido por neurónios do córtex cerebral através de vias corticoespinais; e 2) o sistema de controlo automático, assegurado por neurónios localizados no tronco cerebral e medula.

O sistema de controlo automático é responsável pelo ritmo respiratório básico, assim como pelo ajustamento da ventilação às necessidades metabólicas do organismo, no que se refere ao volume de trocas gasosas. Tal como o sistema de controlo voluntário, também o sistema de controlo automático exerce a sua acção sobre os motoneurónios medulares, distinguindo-se daquele por utilizar vias nervosas diferentes.

ALVÉOLO

TECIDOS



o movimento
assegurar o
rior e o exte-
sa saída dos
a de iões Cl⁻
membrana dos
rio do cloreto

e conversão
ies HCO₃⁻ re-
e juntam aos
rico que, sob
é convertido
iões HCO₃⁻ e
do carbónico,
o. O CO₂ for-
idamente do
le difunde
a hematóse,
e de pressão

ÃO

o o resultado
de músculos
ários) em res-
nios localiza-
tes motoneu-
emas neuro-
mente sobre-
lo voluntário,
cerebral atra-
o sistema de
por neurónios

n. a.
mático é res-
básico, assim
ilação às ne-
nismo, no que
gasosas. Tal
luntário, tam-
nático exerce
ónios medula-
tilizar vias ner-

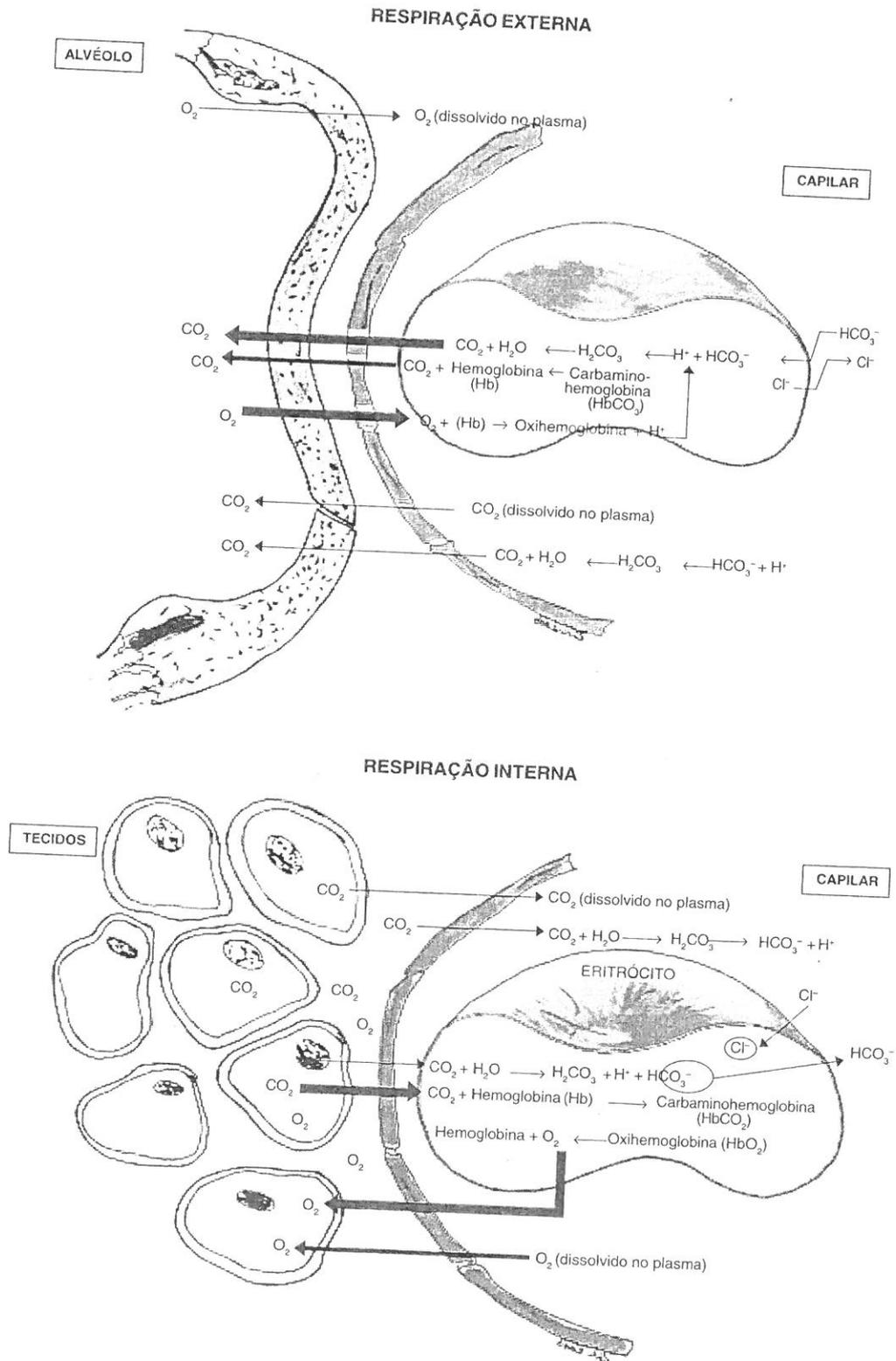


Figura 5.13 – Transporte de CO₂ no sangue.