

# FISIOLOGIA DO EXERCÍCIO

José Gomes Pereira

- 
1. NOÇÃO DE ADAPTAÇÃO FISIOLÓGICA
  2. A TRANSFORMAÇÃO DE ENERGIA QUÍMICA EM MECÂNICA NO MÚSCULO ESQUELÉTICO
  3. FISIOLOGIA CARDIORESPIRATÓRIA
-

# Índice

1. NOÇÃO DE ADAPTAÇÃO FISIOLÓGICA	3
1.1 Relação estímulo-adaptação	4
1.2 Analogia entre estímulo e carga de treino	6
1.3 Noção de carga de treino numa perspetiva exclusivamente fisiológica	7
1.4 A carga de treino vista como um estímulo fisiológico, previsível e controlável, perturbador do equilíbrio homeostático.	10
1.5 Noção de adaptação aguda e adaptação crónica	12
2. A TRANSFORMAÇÃO DE ENERGIA QUÍMICA EM MECÂNICA NO MÚSCULO ESQUELÉTICO	13
2.1 O processo anaeróbio aláctico, anaeróbio láctico e aeróbio	15
2.1.1 Vias metabólicas e substratos energéticos	16
2.1.2 Importância do conhecimento dos processos de produção de energia para a compreensão dos diferentes tipos de esforço desportivo	20
3. FISILOGIA CARDIORRESPIRATÓRIA	21
3.1 Principais alterações genéricas da função cardiorrespiratória na resposta aguda ao esforço aeróbio	21
3.1.1 Componente central e periférica	25
3.1.2 Adaptações cardíacas, vasculares e hemodinâmicas, musculares	27
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34





## OBJETIVOS DE APRENDIZAGEM

Conhecimento e interpretação do funcionamento do organismo humano. Conhecimento da anatomia e fisiologia da estrutura e da função, bem como da forma como se processa a resposta aos estímulos e correspondente adaptação. Conhecimento de alguns conceitos básicos, anatómicos e fisiológicos, que ajudam à compreensão do processo de treino desportivo.

# 1. NOÇÃO DE ADAPTAÇÃO FISIOLÓGICA

O conhecimento e a interpretação do funcionamento do organismo humano são um desafio à nossa compreensão e raciocínio. Trata-se, de facto, de um estudo e de um desafio infindáveis, atendendo aos novos conhecimentos que, diariamente, a investigação científica coloca ao nosso dispor. O corpo humano é uma “máquina” prodigiosa, intrigante, bela e sofisticada, alicerçada numa complexa interação entre sistemas que lhe permitem manter o equilíbrio morfológico e funcional.

O estudo e o conhecimento da anatomia e fisiologia são elementos imprescindíveis na “bagagem” de um profissional do treino desportivo. Permitem o conhecimento da estrutura e da função, bem como da forma como se processa a resposta aos estímulos e correspondente adaptação. No presente texto, procuraremos abordar alguns conceitos básicos, anatómicos e fisiológicos, que ajudam à compreensão do processo de treino desportivo.



FISIOLOGIA DO EXERCÍCIO

## CONCEITOS TERMINOLÓGICOS BÁSICOS

**Anatomia** é a ciência que se ocupa do estudo da estrutura, da forma e da morfologia dos diferentes elementos constituintes do corpo humano.

O estudo da anatomia não é dissociável do da fisiologia. Esta estuda a função, o funcionamento “normal” dos diferentes constituintes do corpo humano, entendidos como estruturas dinâmicas.

Decorrente dos dois parágrafos anteriores, entende-se o facto de o presente texto sobrelevar

uma perspetiva anatomofisiológica. Clarificando um pouco melhor a questão terminológica, podemos referir que o estudo morfofuncional do organismo humano se pode fazer a vários níveis: o químico, o ultraestrutural celular, o celular, o dos tecidos, o dos órgãos e o dos sistemas.

A nível químico, consideram-se as diferentes reações e interações ao nível dos átomos e das moléculas. A estrutura química de uma molécula



é determinante da sua função. Um pouco mais adiante compreenderemos a importância da bioquímica no estudo da resposta adaptativa em treino desportivo.

O nível ultraestrutural celular (organelos), objeto de estudo apenas com o auxílio de microscopia eletrónica, compreende os diferentes constituintes da célula. A célula é constituída por organelos. Por exemplo, o núcleo é um organelo que contém a informação responsável pela hereditariedade. A mitocôndria é um organelo onde se processam as reações aeróbias geradoras de energia.

O nível celular compreende o estudo da célula enquanto unidade básica estrutural e funcional. O conhecimento das características das diferentes células é fundamental para a compreensão da fisiologia dos tecidos, órgãos e sistemas. Por exemplo, a célula muscular (fibra muscular) possui características próprias que determinam as características funcionais e adaptativas do tecido muscular.

A um conjunto de células que possuem unidade estrutural e que desempenham a mesma função designa-se tecido. Logo, “tecido” é um conjunto

de células que contribuem no seu conjunto para a mesma função e que possuem identidade estrutural. O tecido muscular é disso um exemplo. No nosso organismo existem vários tipos de tecidos. Os básicos são o epitelial, o conjuntivo, o nervoso, além do já referido tecido muscular.

Um ou mais tipos de tecidos podem interagir para a efetivação de uma função comum. Neste caso, estamos na presença de um órgão. Portanto, órgão é um conjunto de um ou mais tipos de tecidos que atuam para um fim comum. O coração é um órgão, também o é o músculo cujos constituintes são compostos maioritariamente por tecido muscular e conjuntivo.

Ao conjunto de órgãos que apresentam funções comuns designa-se aparelho. Quando, para além de apresentar funções comuns, associa a semelhança estrutural, estamos na presença de um sistema.

Organismo designa o ser vivo considerado como um todo. Como facilmente se depreende, o organismo humano é complexo, possui uma organização funcional constituída por células, tecidos, órgãos, aparelhos e sistemas, interdependentes.

## 1.1 Relação estímulo-adaptação

O ser humano tem capacidade para reagir a estímulos. Quando estes possuem determinadas características, ocorrem fenómenos de adaptação. Por **estímulo** entende-se um fator, interno ou externo ao organismo, que determina uma resposta específica de um sistema, aparelho, órgão ou tecido excitável. Em biologia, são inúmeros os estímulos capazes de provocar as mais diversas respostas orgânicas: nervosas, endócrinas, metabólicas, entre outras. Os estímulos internos, regra geral, concorrem para a unificação, integração e coordenação dos processos orgânicos. Em suma, para a manutenção do equilíbrio do meio interno: **homeostasia**.

A importância da estabilidade do meio interno foi enfatizada pelo fisiologista francês Claude Bernard (1813-1878) que já em 1859 havia postulado a necessidade de manter dentro de limites estreitos a estabilidade do meio interno do organismo. Referiu ainda que os animais superiores (complexos pluricelulares), mercê dos mecanismos homeostáticos, poderiam manter-se vivos mesmo perante significativas variações do meio (condições externas). A designação de

homeostasia, do grego *homeo* (mesmo) e *stasis* (estado), coube ao fisiologista norte-americano Walter Cannon (1871-1945), distinto seguidor dos trabalhos de Bernard. Neste contexto, entende-se por **homeostasia** a forma dinâmica como o organismo humano mantém o seu equilíbrio interno em relação com o meio. No âmbito da atividade física, e particularmente no do treino desportivo, a adaptação ao esforço desenvolve-se mediante a utilização de estímulos de origem externa que, quando administrados segundo critérios pré-estabelecidos, perturbam o equilíbrio homeostático e podem proporcionar o acesso ao objetivo último do treino, ou seja: um estado de adaptação conducente à obtenção de um elevado nível de rendimento desportivo.

O processo de preparação desportiva, vulgarmente designado **treino** ou **processo de treino**, tem como objetivo o desenvolvimento das adaptações orgânicas necessárias à produção de trabalho adequado à especificidade de uma determinada especialidade desportiva.

# HOMEOSTASE



A homeostase requer uma interação dos vários sistemas regulatórios. Informação sobre os níveis de água, oxigénio, açúcar no sangue, temperatura corporal e pressão arterial estão ligadas a um centro nervoso coordenador que, uma vez detetadas alterações, promove os respetivos equilíbrios.



### ESTÍMULO



### CORRENTE SANGUÍNEA

O sangue circula e distribui o calor por todo o corpo.



### EVAPORAÇÃO

O processo de transpiração promove a evaporação da água e ajuda a regular a temperatura do corpo.



### CÉREBRO

O hipotálamo é o responsável pelas reações aos estímulos externos. Promove a regulação da temperatura corporal.



### RINS

Promovem a manutenção dos níveis de água adequados no corpo.



### PÂNCREAS

Regula os níveis de açúcar no organismo.



### MÚSCULOS

Contraem e descontraem promovendo a libertação de calor.



A adaptação é uma propriedade do ser humano, partilhada também por outros seres vivos e que lhes permitem suportar a “dura tarefa” de se manterem vivos, ultrapassando as dificuldades que constantemente o põem à prova, na sua relação com um meio em permanente mudança, nomeadamente nas situações particulares de empenhamentos mais intensos, como pode ser o caso da atividade desportiva e, neste caso particular, o desempenho desportivo.



Uma condição necessária ao estabelecimento de fenómenos adaptativos é a existência de um **estímulo**. Este pode ser natural ou artificial, espontâneo ou programado, mas terá sempre de possuir características que lhe permitam provocar uma reação orgânica de magnitude suficiente para desencadear o processo adaptativo.

A administração do estímulo – entendida neste caso particular como prescrição do exercício – baseia-se no conhecimento e domínio das características mais determinantes do estímulo, tanto internas como externas, objetivando a melhoria do desempenho desportivo.

Por prescrição do exercício, de acordo com os consensos do ACSM (American College of Sports Medicine), entende-se que é *um processo através do qual o estabelecimento de recomendações para um regime de atividade física é concebido de forma sistemática e individualizada*.

## 1.2 Analogia entre estímulo e carga de treino

Em treino desportivo, o estímulo designa-se **carga de treino**. Esta possui características particulares que, uma vez conhecidas e ponderadas, influenciam os critérios utilizados na sua administração. As características particulares da carga de treino podem ser consideradas a dois níveis: **as intrínsecas** e **as extrínsecas**.

◆ **As intrínsecas** não são modificáveis pelo treinador, importando apenas conhecê-las. Consubstanciam as características que toda e qualquer carga de treino possui na sua estrutura e que não podem ser alteradas. Os treinadores conhecem-nas por “leis da carga de treino”. Importa, isso sim, através do conhecimento da sua existência utilizá-las na direção desejada e assim influenciar favoravelmente o processo adaptativo.

◆ **As extrínsecas** são modificáveis pelo treinador. Constituem a base fundamental do processo prescritivo e caracterizam-se por fatores de ordem quantitativa e qualitativa. Os treinadores conhecem-nas por “componentes da carga de treino”.

### 1.3 Noção de carga de treino numa perspetiva exclusivamente fisiológica

As características intrínsecas e extrínsecas da carga de treino podem ser vistas à luz de uma explicação eminentemente fisiológica. De uma forma puramente didática, podemos referir que, no âmbito das características intrínsecas da carga de treino, reconhece-se a **reversibilidade**, a **especificidade** e a **retardabilidade**.

Estas características encontram perfeita semelhança e compreensão nos já referidos estímulos fisiológicos na sua mais ampla aceção. Vejamos.

#### REVERSIBILIDADE

Tudo e qualquer estímulo possui um efeito orgânico mais ou menos duradouro. Estímulos há que provocam um estado de adaptação irreversível, ainda que aplicados uma única vez. Damos como exemplo algumas infeções virais que, perturbando temporariamente a homeostasia, permitem um posterior estado de adaptação que se caracteriza pela obtenção de uma imunidade “vitalícia”. Este é o princípio da vacinação. O treino desportivo, ao invés, utiliza estímulos que se caracterizam por possuírem uma significativa reversibilidade, razão pela qual os seus efeitos perduram pouco, sendo necessário reaplicá-los periodicamente. Toda e qualquer carga utilizada em treino, embora de forma e com tempos diferentes, comportam reversibilidade.

#### ESPECIFICIDADE

A carga de treino apresenta características próprias que lhe concedem a possibilidade de estimularem níveis específicos de adaptação. Neste âmbito, pode ser questionado se a especificidade é uma característica própria, intrínseca à carga, ou se é algo que o prescritor da atividade (treinador) modifica, direcionando desta forma o nível de adaptação desejado. Estamos convictos de que a especificidade da carga é conferida pela relação existente entre as suas diferentes componentes, conceitos que clarificaremos um pouco mais adiante. As componentes, bem como os critérios com que são interrelacionadas e aplicadas, dependem exclusivamente das opções metodológicas do treinador. Neste sentido, podemos considerar a especificidade como característica modificável. No entanto, uma vez estabelecido o estímulo e o critério de aplicação, a especificidade é algo que é estruturalmente intrínseco à carga ou estímulo. Qualquer tipo de atividade motora, mesmo não programada, contém especificidade intrínseca. Aliás, o mesmo ocorre com a reversibilidade, já referida, e com a retardabilidade, que passaremos a referir.



! No âmbito das características extrínsecas da carga de treino, consideraram-se as componentes que se interinfluenciam mutuamente:

- volume,
- intensidade,
- complexidade,
- densidade.



### RETARDABILIDADE

Em treino desportivo, os efeitos da estimulação não se fazem sentir de forma imediata. Ou seja, existem diferenças temporais, determinadas pela dinâmica (estruturação) da carga de treino, para que se expressem no organismo os reais efeitos, benéficos ou maléficos, dessa estimulação. De facto, a **periodicidade ótima de estimulação** não é a mesma para todo e qualquer estímulo. Esta questão prende-se com o conceito de adaptação aguda e adaptação crónica, abordado um pouco mais adiante. Interessa agora realçar que todo e qualquer estímulo utilizado no processo de treino, provoca alterações homeostáticas que se caracterizam por ajustamentos imediatos, resposta imediata ao estímulo, e por efeitos retardados que, manifestando-se em tempos diferentes para cargas também diferentes, constituem uma característica intrínseca à própria carga que, para efeitos prescritivos, importa conhecer.

No âmbito das características extrínsecas da carga de treino, importa, como já foi referido, considerar as suas componentes. Porque as diferentes componentes da carga de treino se influenciam mutuamente, a sua divisão e apresentação parcelar apenas se justifica no plano meramente didático. Neste contexto, por componentes da carga de treino entendem-se: o **volume**, a **intensidade**, a **densidade** e a **complexidade**.

### VOLUME

Traduz a componente quantitativa da carga de treino. Expressa-se, na maior parte dos casos, através do tempo de permanência do estímulo. Tomemos como exemplo um esforço de corrida contínua com a duração de 30 minutos. Neste caso, o volume pode ser expresso pelo tempo de atividade (30 minutos), mas também pode ser expresso pelo número de metros percorridos. No entanto, se o expressarmos pelo número de metros, não estamos a caracterizar apenas o volume, mas também a intensidade a que esse volume foi cumprido. Neste caso, uma maior intensidade de esforço no decurso dos 30 minutos repercutir-se-á sempre num maior número de metros percorridos.

### INTENSIDADE

Traduz a componente qualitativa da carga de treino. Pode ser expressa de várias formas. A velocidade a que se realiza determinado exercício ou a magnitude da resistência a vencer (por exemplo, peso de um haltere) para o caso específico do treino da força são apenas dois exemplos possíveis, comumente utilizados pelo treinador. Numa perspetiva fisiológica, identificável com a noção de carga

interna, conceito que abordaremos um pouco mais adiante, também múltiplas são as possibilidades para a caracterização da intensidade, materializada através da utilização de variadíssimos parâmetros fisiológicos e bioquímicos, cuja seleção depende do que se pretende caracterizar e que assumem maior ou menor sofisticação consoante os meios tecnológicos disponíveis. Aqueles que mais se têm vulgarizado na vertente aplicativa do treino são a frequência cardíaca, a lactatemia e o consumo de oxigénio. A percepção subjetiva de fadiga, também designada de percepção subjetiva de esforço, da terminologia anglo-saxónica *perceived exertion*, constitui um procedimento que, quando convenientemente utilizado, pode fornecer importantes indicações globais sobre o impacto fisiológico da carga de treino. Mais adiante, abordaremos com algum detalhe as formas enunciadas anteriormente para a caracterização da intensidade.

### ■ DENSIDADE

Podemos aceder a esta componente da carga de treino através do quociente entre o tempo útil e o tempo total de treino. A densidade fornece informações complementares ao volume e à intensidade, uma vez que estabelece uma relação quantitativa entre os períodos de atividade e as respetivas pausas. Em primeira análise, pode apresentar-se como redundante às duas componentes referidas anteriormente (volume e intensidade). No entanto, particularmente no treino das diferentes formas de manifestação da resistência, trata-se de uma abordagem possuidora de múltiplas potencialidades, pela diversidade possível nas suas aplicações.

### ■ COMPLEXIDADE

Traduz o grau de dificuldade da tarefa de treino. Como é sabido, o conhecimento do maior ou menor grau de dificuldade da tarefa influencia a inter-relação entre as demais componentes da carga de treino. Existem objetivos em treino onde é fundamental considerar a complexidade da carga, como, por exemplo, em algumas variantes do treino da velocidade. No caso particular dos jogos desportivos coletivos, onde por variadíssimas vezes se torna necessário estabelecer e estabilizar determinados automatismos, especificamente no âmbito do treino tático, esta componente assume particular importância. Importa ainda considerar, corroborando algo do que anteriormente foi referido, que a carga de treino, entendida como estímulo ou carga funcional, perturbadora potencial do equilíbrio hemostático, permite dois âmbitos de abordagem, a carga externa e a carga interna, que podem caracterizar-se da seguinte forma.



**CARGA EXTERNA:** identifica-se com o ato prescritivo em treino. Traduz a tarefa, a “receita” que o treinador prescreve com o objetivo de desenvolver, por exemplo, determinada forma de manifestação da atividade motora. Identifica-se fundamentalmente com critérios de ordem metodológica e até pedagógica, inerentes à prescrição da atividade. São o domínio da especialidade do metodólogo, particularmente o treinador, onde são estabelecidos os contornos da configuração externa da carga de treino, nomeadamente a sua dinâmica, através da inter-relação entre as suas diferentes componentes.

**CARGA INTERNA:** refere-se à repercussão biológica resultante da administração de uma carga de treino (carga externa). Todo e qualquer estímulo provocam uma reação orgânica que depende das características dessa carga e do indivíduo sobre o qual a carga atua. As características da carga são, como já vimos, estabelecidas ao nível da carga externa. A reação orgânica, dependente do sujeito, pode ser equacionada à luz do conceito de carga interna. O seu domínio de especialidade pressupõe a quantificação e interpretação, através de procedimentos científicos credíveis, das alterações biológicas, individualizadas, induzidas pela carga externa.

## 1.4 A carga de treino vista como um estímulo fisiológico, previsível e controlável, perturbador do equilíbrio homeostático.

### Conceito de treino desportivo

Estamos agora em condições de definir treino desportivo numa perspetiva biológica e à luz dos conceitos já enunciados. Neste contexto, a definição de treino desportivo pode ser assim formulada:



### Treino desportivo

Prescrição e aplicação de estímulos (cargas de treino) que respeitam os processos de adaptação psicobiológica do organismo e que induzem, de forma programada, modificações funcionais e morfológicas, de caráter agudo ou crónico, propiciadoras da obtenção de um adequado nível de rendimento desportivo.

De facto, o processo de adaptação do organismo ao esforço exigido no decurso da preparação de um atleta obtém-se quando o estímulo atinge um impacto biológico compatível com os diferentes limiares de adaptabilidade do sujeito. Por limiares de adaptabilidade, diferentes consoante os objetivos do treino e características do indivíduo, entendem-se as alterações homeostáticas que proporcionam fenómenos de sobrecompensação.

Os fenómenos de sobrecompensação (*overcompensation*, na terminologia anglo-saxónica) encontram a sua fundamentação e quadro explicativo nas modificações biológicas decorrentes da aplicação dos estímulos de treino, de caráter quer físico quer mental, divisão eminentemente didática, uma vez que o processo

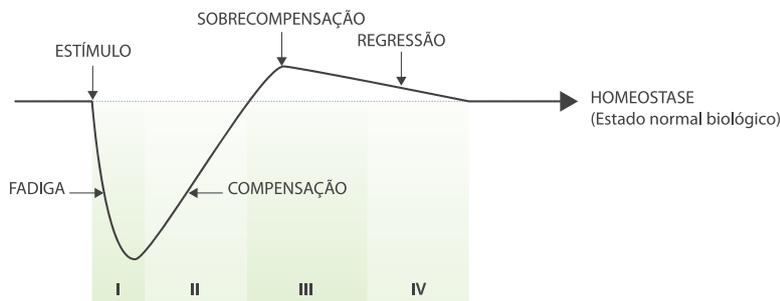


adaptativo decorrente do treino traduz sempre um processo integrado de âmbito biopsicossocial. Neste contexto, deve a sobrecompensação ser considerada como uma resposta desejável à “agressão” resultante do treino.

É de provecta idade o reconhecimento da existência de uma fase de sobrecompensação, previsível e programada, mensurável e reversível no tempo. Desde os trabalhos pioneiros de Yakovlev (1967) até aos nossos dias, tal constatação não tem sido questionada nos seus pressupostos básicos. Apesar da antiguidade do conceito, mantêm-se atuais as tentativas para identificar, medir e programar as fases de sobrecompensação decorrentes do processo de treino. Constituem estes procedimentos experimentais as verdadeiras bases científicas para o planeamento e programação do treino. Em suma, para a procura do “estado de forma” do atleta, assunto tão atual hoje como há cinquenta anos, quando a escola soviética de treino desportivo difundiu aquele conceito.

Não nos debruçaremos em pormenor sobre as diferentes formas de manifestação e otimização do estado de sobrecompensação, assunto que ultrapassa o presente nível de formação do treinador. No entanto, convém referir que tal desiderato deverá estar presente em todos os procedimentos de treino e de acordo com o objetivo desse mesmo treino. O leitor encontrará alguns meios e métodos que concorrem para a sua identificação, distintos consoante os objetivos do treino, no decurso do desenvolvimento programático das diferentes disciplinas que compõem cada nível de formação.

Na figura seguinte procuraremos ilustrar e explicar de forma sucinta o conceito de sobrecompensação, o qual apresenta diferentes formas e tempos de manifestação, mas sempre decorrentes do binómio estímulo/adaptação.



**FIGURA 1** - Na fase de treino que corresponde à aplicação do estímulo, verifica-se uma diminuição da capacidade adaptativa por efeito da fadiga. É a fase catabólica (I). No entanto, a fadiga controlada é desejável e constitui uma condição fundamental para que ocorra o processo adaptativo. Neste caso, quando se interrompe o exercício, inicia-se a fase de recuperação, assinalada em II (anabólica). No âmbito do processo adaptativo, é possível que esta fase anabólica propicie um estado adaptativo a curto prazo e temporário em que se ultrapassa a capacidade funcional pré-esforço. Quando isto ocorre, considera-se que se atingiu a fase de sobrecompensação (III). Atendendo à reversibilidade que todo e qualquer estímulo utilizado em treino comporta, esta fase de sobrecompensação não é estável e tem tendência a desaparecer (IV) se não for aplicada nova estimulação ou carga de treino.





## 1.5 Noção de adaptação aguda e adaptação crónica

O denominador comum a toda e qualquer atividade física é a transformação de energia química em mecânica no tecido muscular esquelético. De facto, sem ação muscular não há movimento. Sempre que ocorre transformação de energia química em mecânica no músculo, o estado homeostático do organismo tende a alterar-se. Mas o organismo adaptado, mesmo perante estímulos perturbadores da homeostasia, tem capacidade para manter o meio interno relativamente estável. É esta estabilidade que permite a continuidade da atividade fisiológica dos diferentes tecidos, órgãos, aparelhos e sistemas, mesmo na presença de estímulos intensos, como é o caso do exercício.



De facto, o exercício muscular obriga a um conjunto de ajustamentos fisiológicos simultaneamente necessários ao fornecimento de energia ao tecido muscular em hiperatividade e à manutenção da homeostasia. Quando estes ajustamentos fisiológicos correspondem a uma resposta imediata ao exercício e cessam pouco tempo após o termo desse mesmo exercício, dizemos que se trata de uma adaptação aguda.

São disso exemplo o comportamento da frequência cardíaca em esforço, do débito cardíaco ou do lactato sanguíneo. Ou seja, de todos os parâmetros que, modificando-se no decurso do esforço, tendem a normalizar e readquirir os valores de repouso após a cessação desse mesmo esforço.



As alterações fisiológicas que possuem um efeito retardado, que não constituem uma resposta imediata ao exercício e perduram muito para além do termo desse exercício, correspondem a adaptações crónicas.

São disso exemplo a diminuição da frequência cardíaca de repouso (bradicardia), o aumento da massa muscular (hipertrofia), a hipertrofia cardíaca fisiológica do atleta, entre outros. Ou seja, incluem todas as modificações morfológicas e funcionais que configuram fenómenos adaptativos, perduram além do termo do exercício e são observáveis ou avaliáveis também em situação de repouso.

## A transformação de energia química em mecânica no músculo esquelético

Os grupos musculares solicitados num determinado exercício necessitam de um maior suprimento de oxigênio e nutrientes. Esta necessidade é satisfeita através das modificações (adaptações agudas) de praticamente todos os aparelhos e sistemas, com especial ênfase para o cardiovascular e respiratório. Estas respostas imediatas, adaptações agudas do organismo ao exercício, permitem a adequação da capacidade funcional, a sobrevivência do indivíduo durante a permanência do estímulo, bem como uma recuperação rápida e eficaz no pós-esforço imediato.

Após o termo do exercício, além das respostas agudas, importam também as adaptações crônicas. Estas permitem uma adequada resposta perante uma agressão do mesmo tipo no futuro e são responsáveis pela rápida e eficaz regeneração do organismo no plano morfológico, funcional e metabólico. Estas modificações ocorrem a vários níveis, tanto nos músculos solicitados no exercício como nos vários aparelhos e sistemas de suporte a esse exercício. Possuem efeito retardado, quer isto dizer que levam tempo a estabilizar-se. O treino desportivo utiliza a noção de *adaptação aguda* para o controlo da carga de treino e a noção de *adaptação crónica* para o controlo dos efeitos do treino.



## 2. A TRANSFORMAÇÃO DE ENERGIA QUÍMICA EM MECÂNICA NO MÚSCULO ESQUELÉTICO

Do ponto de vista físico, o sistema muscular pode ser considerado como uma máquina capaz de produzir energia mecânica à custa de reações químicas. A bioenergética estuda essas reações através da aplicação de princípios básicos da termodinâmica aos sistemas biológicos.

Energia pode definir-se como a capacidade de um sistema para produzir trabalho. Existem várias formas intertransformáveis de energia. Por exemplo, a energia química contida nas macromoléculas alimentares é convertida em outros tipos energéticos necessários a uma multiplicidade de tarefas biológicas, nomeadamente à conversão de energia química em mecânica operada a nível muscular esquelético.



### Avaliação do trabalho externo

Para a avaliação do trabalho mecânico, é comum utilizarem-se procedimentos ergométricos. Etimologicamente, **ergometria** designa a área de estudo que se ocupa da “medição do trabalho” (ergos: trabalho; metria: medida). **Trabalho** é fisicamente definido como o produto da força (F) pela distância ou deslocamento:  $W = F \times d$ , o que implica necessariamente o emprego de energia. Deste modo, a avaliação da capacidade de trabalho pressupõe, além da determinação de parâmetros fisiológicos e bioquímicos, a utilização de instrumentos que quantifiquem o trabalho mecânico realizado. Tais instrumentos designam-se *ergómetros*.

### Avaliação do trabalho interno

A avaliação do trabalho sob o ponto de vista físico não é completamente satisfatória em termos fisiológicos e metabólicos. Na avaliação do trabalho humano, além da medida do trabalho mecânico, deveremos também recolher dados referentes ao “trabalho interno” (por exemplo, dispêndio energético).

Através de ergómetros podemos conhecer o trabalho mecânico realizado em determinado desempenho motor. Se, simultaneamente, tivermos acesso a dados que traduzam fielmente o dispêndio energético correspondente a esse desempenho, poderemos relacionar o trabalho realizado com a energia despendida para a sua realização. Tal relação fornece-nos, em primeira análise, uma indicação referente à eficiência da atividade muscular.

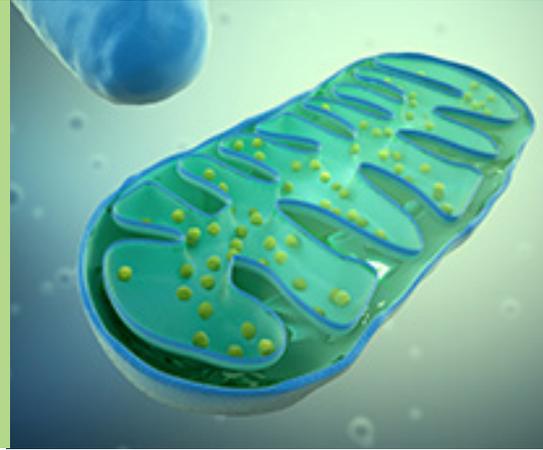
Podemos então definir eficiência da atividade muscular como o quociente entre o trabalho produzido (*output*) e energia utilizada para a realização desse trabalho (*input*).

$$\text{EFICIÊNCIA} = \frac{\text{Output}}{\text{Input}} = \frac{\text{Trabalho produzido}}{\text{Energia consumida}}$$



O sistema muscular produz energia mecânica à custa de reações químicas. A bioenergética estuda essas reações através da aplicação de princípios básicos da termodinâmica aos sistemas biológicos.

MITOCONDRIA



O trabalho produzido é medido através de ergômetros. A energia necessária à sua realização é avaliada através de diferentes procedimentos fisiológicos e bioquímicos que permitem o acesso a parâmetros, selecionados de acordo com os objetivos do teste. Para o cálculo da eficiência da atividade muscular, os procedimentos normalmente adotados inspiram-se na seguinte fundamentação:

*O trabalho produzido por uma máquina na unidade de tempo designa-se potência (W/t). No caso da "máquina muscular", utilizam-se normalmente as seguintes unidades: Kcal.Kg<sup>-1</sup>.h<sup>-1</sup>; Watt; Kg.m.min<sup>-1</sup> e o MET (3.5ml.Kg<sup>-1</sup>.min<sup>-1</sup> de consumo de O<sub>2</sub>). Quando o esforço é predominantemente aeróbio e é realizado em regime estável (sem alterações significativas do quociente potência/VO<sub>2</sub>), utiliza-se também o consumo de oxigênio por unidade de tempo (lit.min<sup>-1</sup> ou ml.kg<sup>-1</sup>.min<sup>-1</sup>), o qual nos vai dar o valor do input, ou seja, a entrada de energia. Por este motivo, naquelas circunstâncias, o consumo de oxigênio constitui o parâmetro de eleição nos estudos da condição física ou da capacidade de produção de trabalho muscular.*



## 2.1 O processo anaeróbio alático, anaeróbio láctico e aeróbio.

Para o normal funcionamento do metabolismo, é necessária energia. Esta encontra-se armazenada em todas as células humanas sob a forma de ATP (trifosfato de adenosina). Logo, o ATP é a forma como o organismo armazena a energia química nas células.

O ATP é um nucleótido de adenina composto por três radicais fosfato. A energia gera-se por hidrólise da molécula de ATP, através da quebra de um radical fosfato.





O músculo transforma energia química (ATP) em mecânica (tensão muscular decorrente do mecanismo fisiológico da contração muscular) através de três vias possíveis: anaeróbia aláctica, anaeróbia láctica e aeróbia.

O músculo é um tecido especialmente adaptado para a transformação de energia química (ATP) em mecânica (tensão muscular decorrente do mecanismo fisiológico da contração muscular). No processo de transformação de energia química em mecânica consideram-se três vias possíveis: a via anaeróbia aláctica, a anaeróbia láctica e a aeróbia. Estas utilizam, respetivamente, os sistemas de produção de energia ATP-CP, o glicolítico e o oxidativo.

Logo, para que a fibra muscular desempenhe cabalmente a sua função mecânica, é fundamental que exista disponibilidade em ATP. Este, por ser escasso, não permite que a contração muscular se prolongue além de poucos segundos. De facto, é necessário que o ATP seja continuamente ressintetizado por forma a assegurar uma concentração muscular estável, sem quebras energéticas significativas. A concentração média de ATP no tecido muscular fresco é da ordem dos  $6 \text{ mM.Kg}^{-1}$ . Com efeito, esta concentração pode ser mantida dentro de variações fisiológicas através do recurso a processos ou vias metabólicas de ressíntese desse mesmo ATP, também conhecidos em linguagem comum de treino desportivo por *fontes de energia*. Estas são em número de três: anaeróbia aláctica, anaeróbia láctica e aeróbia.

### 2.1.1 VIAS METABÓLICAS E SUBSTRATOS ENERGÉTICOS SISTEMA ATP-CP OU VIA ANAERÓBIA ALÁCTICA

O sistema ATP-CP caracteriza-se por uma rápida regeneração de ATP. Possui, porém, uma duração máxima bastante curta, isto porque as reservas de PCr (fosfocreatina ou creatina-fosfato) diminuem e a sua reposição é lenta. A diminuição das reservas de PCr e conseqüentemente de ATP levam à fadiga, impossibilitando a continuação do esforço ou implicando uma baixa da intensidade do mesmo.



## A transformação de energia química em mecânica no músculo esquelético

A via metabólica ATP-CP é o sistema energético mais simples e designa-se anaeróbio aláctico por não utilizar oxigénio e não produzir ácido láctico. É predominante em esforços muito intensos e de duração breve (até 20 segundos aproximadamente).

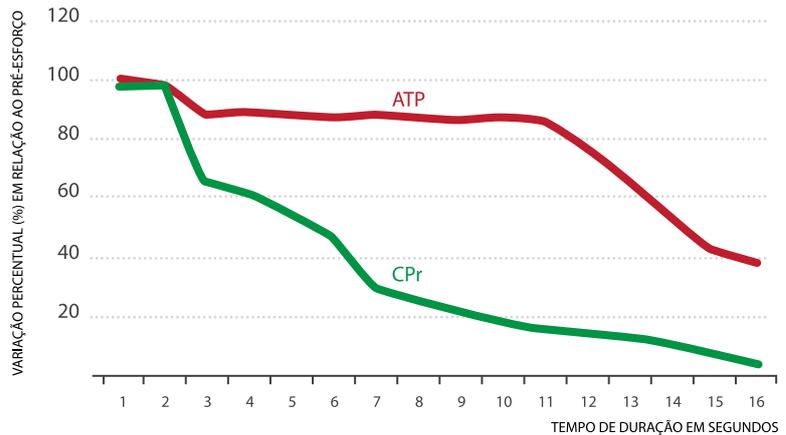
Para este tipo de esforços (anaeróbios alácticos), é necessário que os músculos mantenham a disponibilidade (reservas) em adenosina trifosfato (ATP) - adenosina ligada a três fosfatos inorgânicos e em creatina-fosfato (CPr). A hidrólise do ATP, catalisada enzimaticamente pela ATPase, dá origem a ADP + P com produção de energia necessária à contração muscular, resultante da quebra da ligação fosfato. Uma vez que as reservas em ATP são escassas, é necessário assegurar a sua constante ressíntese. De facto, o ATP é comum a todos os sistemas de produção de energia muscular, variando o processo de ressíntese desse ATP.

No sistema anaeróbio aláctico, a ressíntese do ATP depende da ação da creatina-fosfato (fosfocreatina, PCr). As fibras musculares (células musculares) possuem reservas de fosfocreatina, que também é geradora de energia. A energia derivada da creatina-fosfato também provém da quebra da ligação fosfato (creatina + fosfato + energia), catalisada pela enzima creatina-quinase (CK). No entanto, ao contrário do que se verifica na energia que resulta da hidrólise do ATP, neste caso, a proveniente da creatina-fosfato não serve para assegurar a contração muscular mas sim para a contínua ressíntese de ATP através da reação inversa ( $ADP + P + energia \rightarrow ATP$ ). Desta forma, o tecido muscular assegura a manutenção de níveis metabolicamente adequados em ATP. Por outro lado, enquanto existir disponibilidade metabólica das reservas musculares locais em creatina-fosfato, o ATP é ressintetizado de forma rápida. Tal situação possibilita, em termos práticos, a realização de exercícios de velocidade e potência. Ou seja, aqueles que exigem uma elevada produção de trabalho muscular num curto espaço de tempo.

A figura 2 evidencia o processo anaeróbio aláctico de acordo com o que foi anteriormente descrito. Podemos observar a variação da concentração de ATP e PCr no decurso de um exercício de 15 segundos de duração, realizado a uma intensidade máxima para esse tempo de duração. Verificamos que até aos primeiros 10 segundos de esforço a concentração de ATP não se altera significativamente mercê do processo de ressíntese na dependência da creatina-fosfato (CPr). Esta, também decresce, embora mais tarde (cerca dos 10 segundos), não sendo por isso possível manter constantes os níveis de ATP. Tal facto explica o limiar de fadiga muscular local em esforços anaeróbios alácticos. Quando as reservas em ATP e PCr decrescem de forma muito significativa, sobrevém e instala-se a fadiga que já se havia iniciado desde a fase inicial de decréscimo da PCr. A partir desta fase, não mais é possível manter o mesmo nível de intensidade ou mesmo a continuidade do exercício, o mesmo será dizer, a continuidade da velocidade de ressíntese ou produção de ATP, a qual passará a ser assegurada por outro processo energético, a fim de se poder dar continuidade ao exercício.



FIGURA 2 - Variação da concentração de ATP e PCr no decurso de um exercício de 15 segundos de duração.



Concretizando o que foi referido, apesar das reservas em ATP serem escassas, podem ser rápidas e imediatamente ressintetizadas através de outro composto fosforilado, também designado por *fosfagénio*, que se encontra armazenado na célula muscular. Referimo-nos à creatina-fosfato ou fosfocreatina (CPr). A sua concentração muscular é cerca de seis vezes superior ao ATP. A ressíntese do ATP pela creatina-fosfato permite que o tecido muscular esquelético prolongue a sua atividade voluntária em exercícios de intensidade muito elevada. Trata-se de obter energia de forma direta, rápida e imediata por um período que, apesar de curto, se pode prolongar em torno dos 20 segundos. Esta constitui a primeira forma de obtenção de energia e utiliza diretamente os compostos fosfatados musculares. Permite a realização de tarefas de treino muito intensas e de curta duração, como é o caso do *sprint*.

### O SISTEMA GLICOLÍTICO OU VIA ANAERÓBIA LÁCTICA

Constitui a segunda via de ressíntese de ATP, utilizando para tal a degradação do glicogénio (forma como a glicose é armazenada nos músculos). O glicogénio é um polissacarídeo formado por várias moléculas de glicose. Para a obtenção da energia necessária à ressíntese do ATP, permitindo a continuidade do esforço, o músculo degrada o glicogénio em glicose (glicogenólise) que, por sua vez, através da glicólise se transforma em ácido pirúvico, gerando duas moléculas de ATP. Desta forma, proporciona-se energia adicional para a continuação do exercício e da atividade muscular. O ácido pirúvico assim formado tem possibilidade de prosseguir uma via metabólica que lhe permite gerar novas moléculas de ATP. Para isso, é necessária a presença de oxigénio, uma vez que essa via é oxidativa ou aeróbia.

No entanto, o oxigénio pode não estar disponível, ou podem as fibras musculares possuírem características que não lhes permitem utilizar de forma eficaz o oxigénio, como é o caso das *fibras musculares brancas ou tipo II*, também



## A transformação de energia química em mecânica no músculo esquelético

designadas *fibras musculares de contração rápida*. Nestas circunstâncias, o ácido pirúvico transforma-se em ácido láctico. Por este motivo, designa-se via anaeróbia (sem oxigénio) láctica (com produção de ácido láctico). Outra designação possível é a *glicolítica*, por utilizar como único substrato energético a degradação da glicose de forma anaeróbia. Trata-se de um processo metabólico que possibilita a obtenção de uma grande quantidade de energia num período de tempo relativamente curto. Permite a realização de atividade muscular por um tempo superior á anaeróbia aláctica, embora com uma menor intensidade. A ressíntese do ATP por esta via é predominante em esforços intensos de duração entre os 30 segundos e os três minutos, aproximadamente.



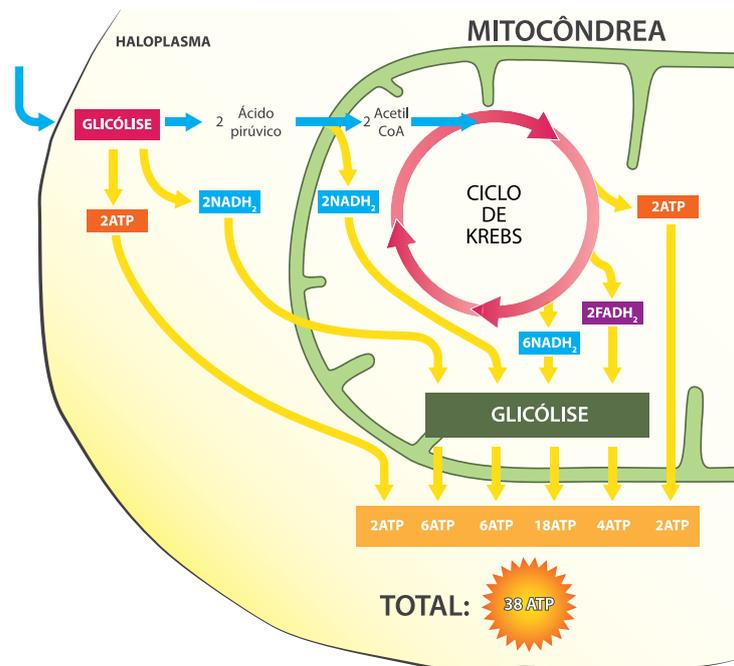
### O SISTEMA OXIDATIVO OU VIA AERÓBIA

Abordaremos agora, em terceiro lugar, o processo energético baseado no metabolismo aeróbio. Trata-se de um processo de ressíntese de ATP também designado de oxidativo. Comporta uma série de reações bioquímicas em cadeia - ciclo de Krebs - em que os substratos energéticos são completamente oxidados, dando como produtos finais o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e a água ( $\text{H}_2\text{O}$ ).

O processo oxidativo pode utilizar diferentes substratos energéticos, nomeadamente os glúcidos (açúcares ou hidratos de carbono) e os lípidos (gorduras). Esta constitui uma das particularidades que diferencia esta fonte energética das duas descritas anteriormente, onde nunca são utilizados os lípidos (gorduras) como substrato energético. O processo aeróbio de ressíntese do ATP assegura o suprimento energético em esforços prolongados e de baixa intensidade, em regime de resistência, mas também em esforços intermitentes e/ou alternados, particularmente nos períodos de recuperação ou de menor intensidade.



Como vimos, os exercícios aeróbios estão relacionados com os mecanismos de transporte e utilização do oxigénio. O processo bioquímico subjacente ao esforço aeróbio intenso no desportista é glicólise aeróbia (metabolização oxidativa da glucose processada nas mitocôndrias). A glicólise tem duas fases: uma citoplasmática onde se formam dois ATP e ácido pirúvico e outra mitocondrial, onde tem lugar o ciclo de Krebs, formando-se 38 ATP. Este processo permite a obtenção de maior quantidade de energia do que a conseguida no metabolismo energético anaeróbio. Não provoca uma baixa tão pronunciada do pH pela menor produção de ácido láctico e os produtos finais são a água e o  $\text{CO}_{\text{v}}^{\text{v}}$  que é eliminado pela expiração.



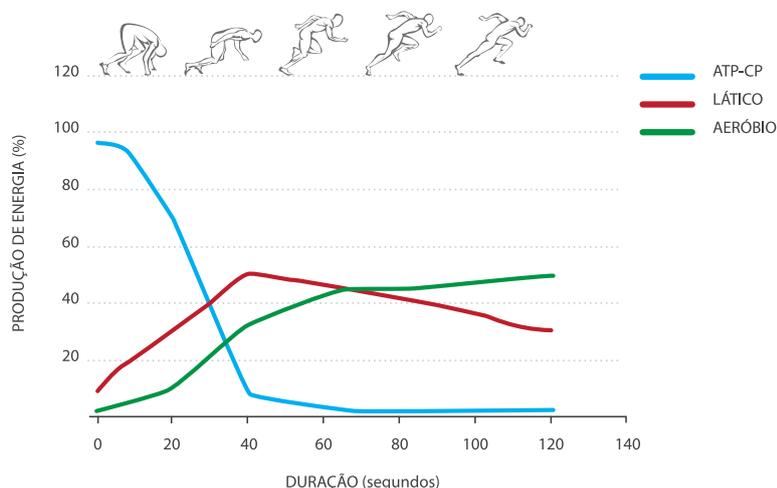
**FIGURA 3** - Glicólise é a metabolização da glicólise (glico + lise). Esta metabolização pode ser anaeróbia (no citoplasma ou haloplasma) e aeróbia (nas mitocôndrias). A glicólise tem duas fases: uma citoplasmática, onde se formam dois ATP e ácido pirúvico e outra mitocondrial, onde tem lugar o ciclo de Krebs, formando-se 38 ATP.

No esforço aeróbio também é possível utilizarem-se as gorduras (lípidos) como substrato energético. Os ácidos gordos são metabolizados aerobicamente na mitocôndria através de um processo bioquímico designado beta-oxidação.

### 2.1.2 IMPORTÂNCIA DO CONHECIMENTO DOS PROCESSOS DE PRODUÇÃO DE ENERGIA PARA A COMPREENSÃO DOS DIFERENTES TIPOS DE ESFORÇO DESPORTIVO

É importante salientar que a descrição de forma separada dos três sistemas energéticos ou vias metabólicas não traduz independência entre elas. Justifica-se por motivos meramente didáticos. De facto, existe interdependência e interação entre os diferentes processos de ressíntese do ATP.

A predominância de um em relação aos outros é uma realidade, mas nunca operam em exclusividade. A predominância de um em relação aos outros depende das características do exercício, nomeadamente dos aspetos qualitativos - **INTENSIDADE** - e quantitativos - **VOLUME**.



**FIGURA 4** - Exercício de intensidade máxima para o tempo considerado em cada processo energético. O pico de cada curva corresponde à potência desse processo energético. A área que cada curva define em relação aos dois eixos corresponde à capacidade. Logo, a fonte energética mais potente é a anaeróbia aláctica (esforços de potência do tipo explosivo) e a de maior capacidade é a aeróbia (esforços de resistência aeróbia). O exemplo representado no gráfico corresponde a um esforço de corrida.

## 3. FISILOGIA CARDIORRESPIRATÓRIA

### 3.1 Principais alterações genéricas da função cardiorrespiratória na resposta aguda ao esforço aeróbio.

Tomando como base as explanações anteriores sobre bioenergética muscular, facilmente se depreende que o Homem utiliza, por via de regra, o sistema aeróbio e, em circunstâncias excepcionais, e por tempo muito limitado, o processo anaeróbio de ressíntese do ATP. Os bons atletas conseguem manter exercícios intensos na dependência da ressíntese aeróbia de ATP. Para isso, deverão possuir um elevado nível de consumo de oxigénio, sem recurso significativo aos processos anaeróbios, tolerando desta forma exercícios intensos durante mais tempo (maior volume ou duração). Compreende-se então o motivo pelo qual o consumo máximo de oxigénio ( $VO_2 \text{ max.}$ ) é



um bom indicador da condição física de um atleta. Por outro lado, se o atleta possuir um bom nível adaptativo cardiovascular e respiratório, consegue fazer chegar ao músculo maior quantidade de oxigénio via circulação sanguínea, prolongando desta forma o funcionamento do processo aeróbio.

A resistência aeróbia, também designada de resistência cardiorrespiratória, depende da capacidade do organismo em captar, fixar, transportar e utilizar o oxigénio. Estas funções, no seu conjunto, constituem o sistema de transporte e utilização de oxigénio. O parâmetro fisiológico que melhor traduz a potencialidade deste sistema é o consumo máximo de oxigénio. Na resposta aguda e crónica ao treino desportivo, ocorrem várias adaptações cardiorrespiratórias. Daqui a importância do estudo destas adaptações aplicadas ao treino e, muito particularmente, na avaliação do desportista.

Com base no que foi referido, passaremos a identificar as funções fisiológicas responsáveis por cada passo do sistema de transporte e utilização de oxigénio. Porque, como já foi referido, o sistema cardiorrespiratório depende da atividade integrada de várias funções fisiológicas.

---

### Ventilação pulmonar - captação

↳ Através desta, capta-se o oxigénio do ar ambiente, criando condições para a renovação do ar alveolar.

---

### Hematose - fixação

↳ Corresponde às trocas gasosas alvéolo-capilares (nos pulmões), sendo o sangue oxigenado através da fixação do oxigénio à hemoglobina contida no sangue capilar perialveolar e a concomitante libertação de dióxido de carbono para o espaço alveolar que, por seu turno, será expulso pela expiração.

---

### Cardiovascular - transporte

↳ Corresponde à componente central do  $VO_2$ . Comporta o coração e os vasos sanguíneos. O primeiro, através dos movimentos cíclicos de contração (sístole) e descontração (diástole), bombeia o sangue para as diferentes partes do corpo. O sangue, bombeado pelo coração, atinge as diferentes partes do corpo circulando dentro dos vasos sanguíneos, retornando posteriormente ao coração. De facto, a circulação sanguínea constitui um circuito fechado, contínuo, utilizando como propulsor uma bomba, o coração, que funciona desde uma fase muito precoce da nossa vida, anterior ao nascimento, até à morte.

---

### Tissular - utilização

↳ Corresponde à componente periférica do  $VO_2$ . É constituída pelos diferentes tecidos que utilizam oxigénio para o seu funcionamento. O tecido muscular é disso um exemplo. Quando a atividade muscular é muito intensa, o músculo aumenta muito a sua taxa metabólica, sendo necessário um grande aumento no suprimento em oxigénio.

O consumo de oxigénio constitui assim um parâmetro fisiológico global, integrador do funcionamento das quatro etapas referidas anteriormente, pelo que fornece indicações importantes sobre a condição cardiorrespiratória do atleta.

### VENTILAÇÃO PULMONAR

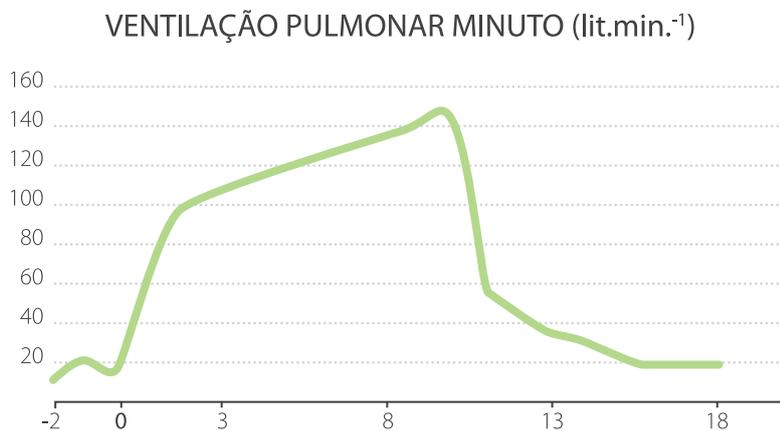
Corresponde à fase de captação do oxigénio do ar ambiente. Por ventilação pulmonar entende-se a quantidade de ar mobilizada durante um minuto, através da inspiração e expiração. O número de inspirações e expirações realizadas durante um minuto designa-se *frequência respiratória*. A quantidade de ar mobilizada em cada ciclo inspiratório/expiratório designa-se *volume corrente*. Logo:

$$\text{VENTILAÇÃO PULMONAR (VE)} = \text{Volume corrente (VC)} \times \text{Frequência respiratória (FR)}$$

O mesmo será dizer que a ventilação pulmonar é a quantidade de ar mobilizada durante um minuto e resulta do produto entre o volume corrente e a frequência respiratória. O seu valor é dado em litros por minuto ( $\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$ ).

Obviamente que a ventilação pulmonar se modifica consoante a intensidade do exercício. O seu valor em repouso é da ordem 4 a 6  $\text{litros}\cdot\text{min}^{-1}$ .

Em esforço máximo, a ventilação pulmonar por minuto pode atingir valores superiores a 150  $\text{litros}\cdot\text{min}^{-1}$ . Este grande aumento faz-se tanto à custa do volume corrente como da frequência respiratória.



**FIGURA 5** - A ventilação pulmonar (VE) aumenta de forma proporcional à intensidade do exercício. Na figura, apresentamos as fases de esforço e pós-esforço. Como foi referido no texto, podemos observar que a VE parte de uma situação basal da ordem dos 10  $\text{lit}\cdot\text{min}^{-1}$  para atingir valores superiores a 140  $\text{lit}\cdot\text{min}^{-1}$  em intensidades próximo do máximo. O aumento da VE deve-se a uma maior necessidade de ventilação alveolar a fim se aumentar o transporte de oxigénio ao músculo e também da necessidade de expelir maiores quantidades de  $\text{CO}_2$  resultantes do metabolismo do esforço.

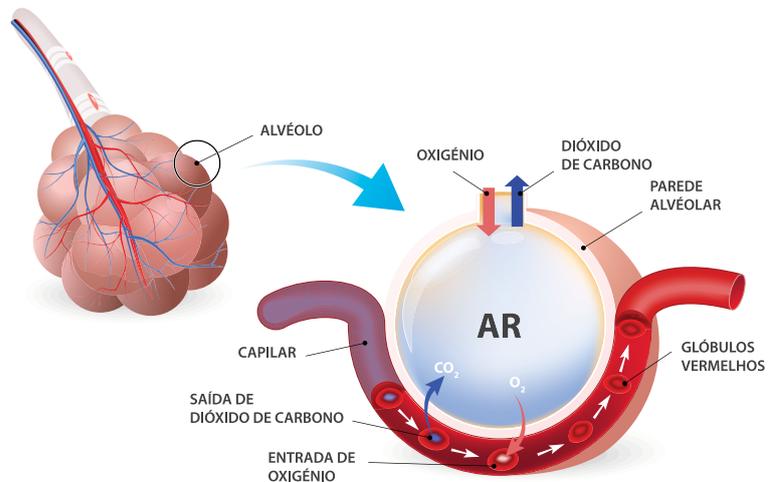
FISIOLOGIA DO EXERCÍCIO

### HEMATOSE

Corresponde à segunda fase da cadeia de transporte de oxigénio – fixação do oxigénio à hemoglobina do sangue capilar perialveolar. Quando entre o ar ventilado no momento da inspiração e que atinge os alvéolos (ar alveolar), e o sangue contido nos capilares peri-alveolares, existe um gradiente de pressão, estão criadas as condições para existirem trocas de gases. As trocas de gases entre os alvéolos

e capilares, através da membrana respiratória, ocorrem por difusão e sempre que a pressão parcial de gases,  $O_2$  e  $CO_2$ , de um lado e de outro da membrana não se encontrem em equilíbrio. Como é sabido, no decurso do exercício, as diferenças nas pressões parciais de  $O_2$  e  $CO_2$  acentuam-se. Logo, o gradiente de pressão de cada lado da membrana favorece uma maior riqueza de trocas. Este processo de trocas gasosas alvéolo-capilares (nos pulmões) designa-se **hematose**. Sabemos que, nos indivíduos saudáveis, a saturação da hemoglobina em oxigénio por efeito do esforço varia de forma discreta e influenciada pela alterações da temperatura do sangue e pH (curva de dissociação da oxiemoglobina). Mais significativo é o aumento da ventilação alveolar associado à maior pressão com que o sangue atinge os capilares perialveolares (perfusão sanguínea perialveolar), que permite uma melhor oxigenação e rejeição de  $CO_2$ . Este tipo de adaptação ao nível da hematose explica-se pelo facto de se melhorar a relação ventilação/perfusão e de se aumentar a superfície de trocas alvéolo-capilares.

**FIGURA 6 - A membrana respiratória.** As trocas de gases entre os alvéolos e capilares, através da membrana respiratória, ocorrem por difusão e sempre que a pressão parcial de gases,  $O_2$  e  $CO_2$ , de um lado e de outro da membrana não se encontrem em equilíbrio. O exercício acentua o desequilíbrio sendo a maior transferência do  $O_2$  do ar alveolar para a circulação uma adaptação favorável ao esforço. Para além de depender da alteração dos gradientes de pressão de cada lado da membrana, depende também da melhoria da relação ventilação/perfusão e do aumento da superfície de trocas alvéolo-capilares.



## CARDIOVASCULAR

Corresponde à componente central do  $VO_2$ . Comporta o coração e os vasos sanguíneos. Depende das adaptações cardíacas agudas que permitem bombear maior quantidade de sangue por minuto e por sístole com também mais elevada pressão sistólica. Depende também das adaptações vasculares seletivas que permitem que o sangue atinja as zonas mais carenciadas em oxigénio que se encontram vasodilatadas. Por seu turno, as zonas inativas recebem menor quantidade de sangue por se encontrarem sob efeito vasoconstritor. A circulação sanguínea constitui um circuito fechado, contínuo, que utiliza como propulsor uma bomba – o coração. A circulação do sangue e as adaptações dos vasos sanguíneos de modo a permitirem uma eficaz distribuição desse mesmo sangue pelas diferentes partes do corpo humano designam-se alterações ou adaptações hemodinâmicas.

A adaptação do coração pode ser avaliada pelas variações do débito cardíaco e das suas componentes. O débito cardíaco resulta do produto da frequência cardíaca (FC) pelo volume sistólico (VS). A frequência cardíaca corresponde ao número de sístoles (contrações cardíacas) por minuto. O volume sistólico corresponde ao volume de sangue expulso em cada sístole. O valor do débito cardíaco é proporcional à intensidade do exercício. Em repouso apresenta um valor próximo dos 5 lit.min<sup>-1</sup> e em esforço máximo aumenta cerca de 5 a 6 vezes.

A adaptação vascular pode ser avaliada através do comportamento da pressão arterial em esforço. A pressão arterial sistólica aumenta por via de regra de forma proporcional ao consumo de oxigénio, débito cardíaco e intensidade do exercício. Define-se como a força que o sangue exerce, no momento da sístole, sobre a superfície da parede arterial à saída do ventrículo esquerdo (artéria aorta). Neste momento, a pressão é máxima. A onda de pressão propaga-se por todo o território arterial. Por esta razão, sentimos a atividade pulsátil em todas as artérias e podemos medir a pressão arterial nas artérias periféricas (umeral ou radial, por exemplo) com o auxílio de um esfigmomanómetro. No momento da diástole (fase de relaxamento do coração), a pressão é mínima, por isso se designa diastólica e na prática dá-nos informação sobre as resistências vasculares periféricas.



## TISSULAR

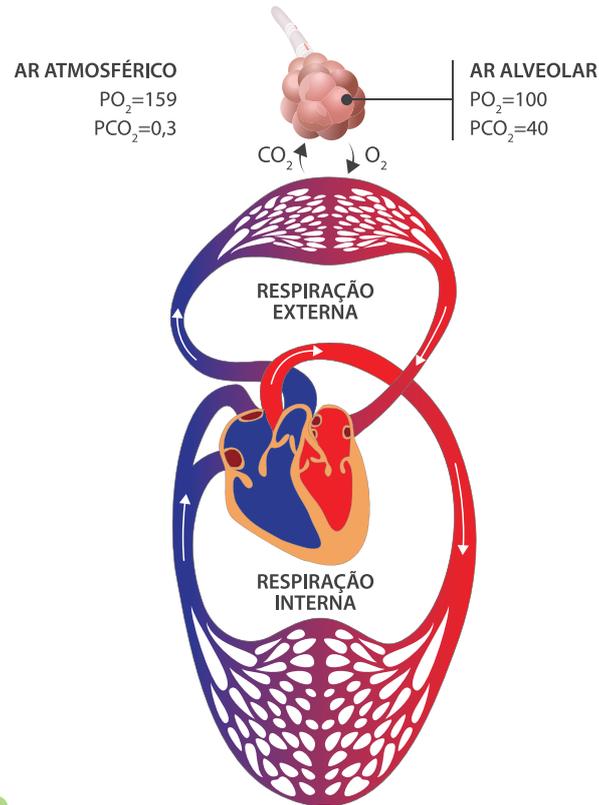
Corresponde à componente periférica do  $VO_2$  e é constituída por todos os tecidos que utilizam oxigénio para o seu funcionamento. Em esforço intenso de características gerais, o tecido muscular ativo recebe 80% e 90% do débito cardíaco. O aumento da taxa metabólica, acompanhada de um maior suprimento de sangue ao músculo e consumo (utilização) de oxigénio local, tem implicações nas concentrações de  $O_2$  e  $CO_2$  no sangue. O contributo da componente periférica no  $VO_2$  é expresso pela quantificação das variações da diferença arteriovenosa em oxigénio entre o repouso e o esforço.

### 3.1.1 COMPONENTES CENTRAL E PERIFÉRICA

No sistema de transporte e utilização de oxigénio, a componente cardiovascular e a componente muscular constituem os passos mais importante e treináveis em todo o processo aeróbio de produção de energia. A componente cardiovascular, responsável pelo transporte de oxigénio ao tecido muscular esquelético corresponde à componente central do  $VO_2$ . Comporta o coração e os vasos sanguíneos. Para a sua melhoria, o desportista deverá seguir um *regime de treino aeróbio designado de cardiovascular ou treino da resistência geral*, onde se utilizam exercícios que solicitem uma percentagem significativa da massa muscular ativa, realizados com elevado volume e densidade, a uma intensidade submáxima. São disso exemplo a corrida, a natação, o ciclismo, o remo, entre outros.

 O sistema cardiovascular, responsável pelo transporte de oxigénio ao tecido muscular esquelético, o corresponde à componente central do  $VO_2$ .

A componente periférica do  $VO_2$  é constituída pelos diferentes tecidos que utilizam oxigénio para o seu funcionamento. No decurso do exercício, o tecido muscular é preponderante na utilização do oxigénio distribuído aos diferentes tecidos. De facto, com o aumento da intensidade do exercício, o músculo aumenta muito a sua taxa metabólica, sendo necessário um significativo aumento do suprimento em oxigénio local com as correspondentes adaptações vasculares. Estas adaptações locais (vasculares e metabólicas tissulares) dependem não só da intensidade do exercício, mas também do tipo de exercício (local ou geral). A componente periférica pode ser mas convenientemente treinada através de exercícios de características locais, restringindo-se e controlando-se a percentagem de massa muscular solicitada. Para a sua melhoria, o desportista deverá ser submetido a um tipo de estimulação designada de resistência muscular local em regime aeróbio.



**FIGURA 7** - A componente cardiovascular, responsável pelo transporte de oxigénio ao tecido muscular esquelético, corresponde à componente central do  $VO_2$ . Compreta o coração e os vasos sanguíneos. A componente periférica do  $VO_2$  é constituída pelos diferentes tecidos que utilizam oxigénio para o seu funcionamento. No decurso do exercício, o tecido muscular é preponderante na utilização do oxigénio distribuído aos diferentes tecidos.



A componente periférica do  $VO_2$  é constituída pelos diferentes tecidos que utilizam oxigénio para o seu funcionamento. No esforço geral e intenso, o tecido muscular é preponderante na utilização do oxigénio distribuído aos diferentes tecidos.



### FÓRMULA DE FICK $VO_2 = Q \times \text{dif. a-v } O_2$

Segundo a fórmula de Fick, o  $VO_2$  resulta do produto entre o débito cardíaco (Q) – componente central – e a diferença arteriovenosa em oxigénio (dif. a-v  $O_2$ ) – componente periférica.

No âmbito da componente central consideram-se os parâmetros fisiológicos débito cardíaco (Q), frequência cardíaca (FC) e volume sistólico (VS).

A diferença arteriovenosa de oxigénio, que é a diferença entre o conteúdo em oxigénio do sangue arterial e o conteúdo de oxigénio do sangue venoso, traduz a utilização de oxigénio pelos tecidos. Se atentarmos na equação de Fick, podemos considerar que esta diferença traduz a componente periférica.

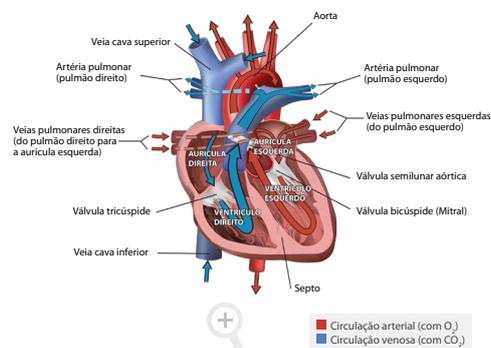
### 3.1.2 ADAPTAÇÕES CARDÍACAS, VASCULARES E HEMODINÂMICAS, MUSCULARES

#### ADAPTAÇÕES CARDÍACAS

Para a compreensão das adaptações cardíacas ao esforço, é fundamental uma breve e sucinta revisão da fisiologia cardíaca.

O coração localiza-se na cavidade torácica entre os pulmões e possui quatro cavidades, duas aurículas e dois ventrículos. A parte muscular do coração designa-se miocárdio e é constituída por células musculares cardíacas excitáveis eletricamente. É um músculo involuntário que possui automatismo e ritmo.

Em termos funcionais, o coração pode ser entendido como duas bombas separadas, o coração direito e o coração esquerdo. Em cada lado do coração, po-



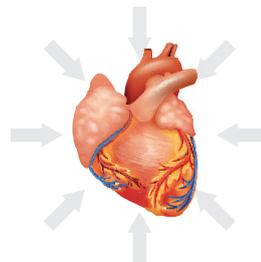
AMPLIAR

demos considerar as aurículas como bombas de enchimento e os ventrículos como bombas de expulsão ou potencia. O funcionamento das aurículas visa o enchimento dos ventrículos com sangue. O funcionamento dos ventrículos tem como objetivo a expulsão do sangue para os territórios arteriais, originando a circulação pulmonar (ventrículo direito) e circulação sistémica (ventrículo esquerdo). O processo de bombeamento do sangue tem carácter repetitivo e sistemático. Faz-se por ciclos. Por **ciclo cardíaco** entende-se o processo repetitivo de bombeamento do sangue e que tem início numa contração muscular cardíaca e termina no início da contração seguinte. Como o sangue se desloca das altas para as baixas pressões, as variações de pressão produzidas dentro das câmaras cardíacas e originadas pela contração e relaxamento do miocárdio são responsáveis pelo movimento do sangue.

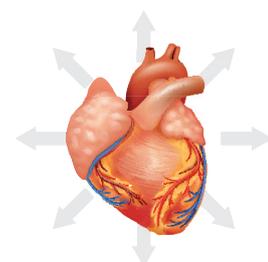
A duração de um ciclo cardíaco é variável. É influenciado por vários fatores e o exercício é um deles. No cidadão comum saudável e não treinado, a duração de um ciclo cardíaco em repouso oscila entre os 0,7 e 0,8 segundos. Depende da capacidade contráctil do miocárdio e da integridade do sistema de condução do estímulo cardíaco intrínseco. No atleta treinado, o tempo de duração do ciclo cardíaco em repouso pode ser superior a um segundo (bradicardia).



Sístole significa contração do miocárdio e diástole relaxamento.



SÍSTOLE



DIÁSTOLE

No ciclo cardíaco, temos de considerar sístoles e diástoles tanto no miocárdio auricular como no ventricular. No início da diástole ventricular, a pressão dentro do ventrículo passa a ser inferior à pressão dentro da aurícula do mesmo lado – o sangue flui das aurículas para os ventrículos, abrindo as válvulas auriculoventriculares e a sístole auricular completa o enchimento ventricular. A sístole provoca um aumento rápido da pressão ventricular, fechando as válvulas auriculoventriculares e abrindo as válvulas pulmonares e aórticas, iniciando-se a circulação pulmonar e a circulação sistémica. O tempo durante o qual o sangue sai dos ventrículos para as artérias pulmonares e aórtica designa-se tempo de ejeção. Durante o período de ejeção, o volume ventricular vai diminuindo com a expulsão do sangue e o relaxamento (diástole) ventricular inicia-se subitamente no fim da sístole, fazendo baixar a pressão intraventricular de forma súbita e criando condições para nova passagem de sangue das aurículas para os ventrículos, iniciando-se novo ciclo cardíaco. O volume de sangue bombeado em cada ciclo cardíaco chama-se *volume*



de ejeção e corresponde ao volume sistólico. Depende da função contráctil do miocárdio e está aumentada em esforço. Designam-se adaptações agudas inotrópicas, têm a ver com força contráctil do miocárdio e provocam aumento do volume sistólico (VS). As durações menores dos ciclos cardíacos verificadas no decurso do esforço, em que são realizados mais ciclos cardíacos por minuto, designam-se *adaptações agudas cronotrópicas*. Têm a ver com o ritmo e provocam um aumento da frequência cardíaca (FC).

A adaptação aguda cardíaca engloba a possibilidade de aumento do débito cardíaco na resposta ao exercício através sístoles ventriculares mais potentes (aumento do VS) e ciclos cardíacos mais curtos (aumento da FC).

A adaptação crónica do coração ao esforço caracteriza-se por um coração morfológicamente maior, onde a hipertrofia ventricular esquerda fisiológica é vulgar em atletas de resistência aeróbia, com ciclos cardíacos mais longos em repouso (bradicardia). Esta adaptação hipertrófica é reversível, pelo que tem tendência a desaparecer, com o tempo, com a interrupção do processo de treino.

#### Adaptações vasculares e hemodinâmicas

O débito cardíaco resulta do produto da frequência cardíaca pelo volume de ejeção sistólica ou volume sistólico. Em esforço, o débito cardíaco aumenta de forma proporcional à intensidade do esforço. Simultaneamente a este aumento, verifica-se também um aumento do retorno venoso, isto é, maior chegada de sangue ao coração direito. Este aumento do retorno venoso está na dependência das alterações vasculares (hemodinâmicas) decorrentes do exercício, onde a vasodilatação dos territórios musculares ativos, a vasoconstrição dos territórios inativos, determinam uma redistribuição do débito cardíaco relativamente à situação de repouso.

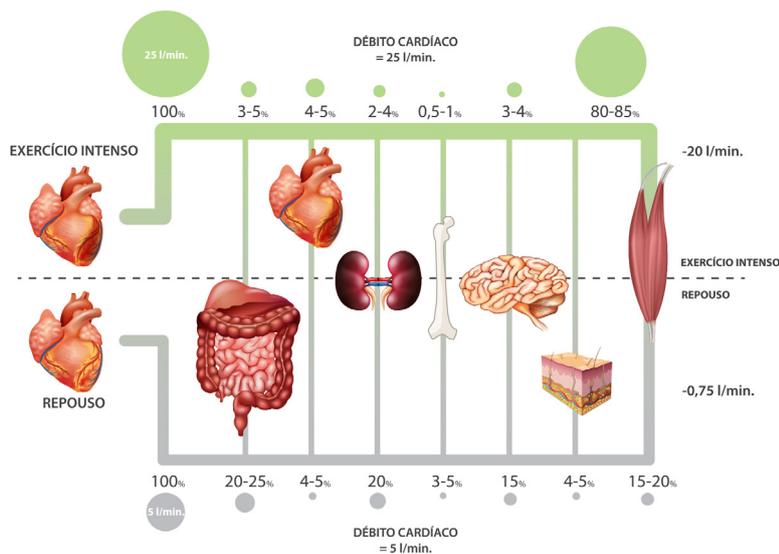
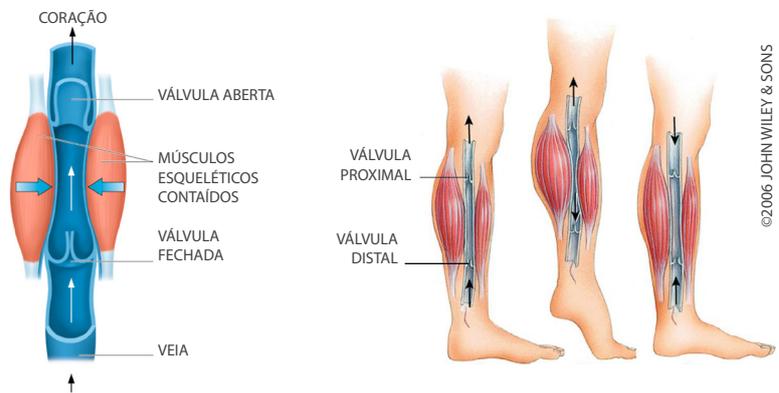


FIGURA 8 - Distribuição do débito cardíaco. Comparação entre o repouso e o exercício máximo de características gerais.

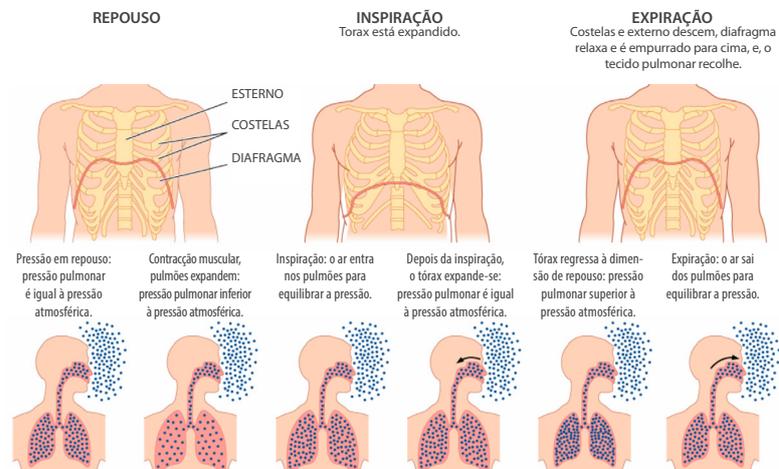
Ainda no âmbito dos mecanismos fisiológicos responsáveis pelo aumento do retorno venoso em esforço, deve ser considerada a ação cíclica da inspiração/expiração, associada à maior atividade contráctil muscular (intermitência entre contração/descontração muscular), as quais ajudam a propulsionar uma maior quantidade de sangue pelo território venoso em direção ao coração direito. Este último mecanismo, designado *bomba muscular*, está prejudicado ou mesmo inibido nos exercícios isométricos, por se tratar de uma contração estática, onde a intermitência contração/descontração não existe.

**FIGURA 9** - Funcionamento da bomba muscular. A atividade contráctil muscular (intermitência entre contração/descontração muscular) ajuda a propulsionar uma maior quantidade de sangue pelo território venoso em direção ao coração direito. Se a contração muscular se mantém por um período de tempo considerável, caso da contração isométrica, o vaso é parcialmente colapsado, prejudicando o retorno venoso.



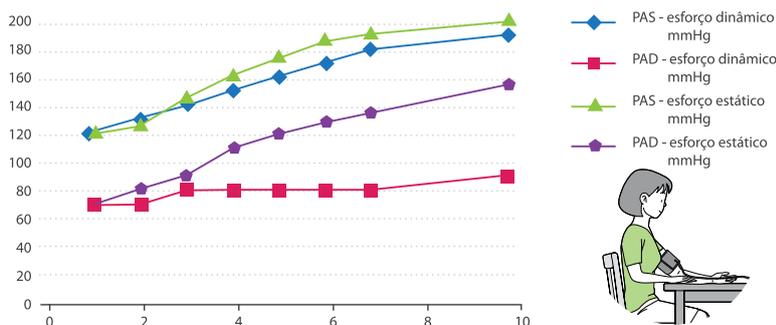
Durante a fase inspiratória, o diafragma baixa, reduzindo-se a pressão intratorácica, o que favorece o enchimento cardíaco, uma vez que o sangue flui das altas para as baixas pressões. Este mecanismo fisiológico de facilitação do retorno venoso designa-se *bomba respiratória* ou *bomba toracoabdominal* atendendo às variações intermitentes das pressões entre a cavidade torácica e abdominal por efeito da subida e descida do diafragma aquando das fases expiratória e inspiratória. Este mecanismo está prejudicado ou mesmo inibido nos exercícios realizados em apneia pela inexistência de ciclicidade entre inspiração/expiração.

**FIGURA 10** - Funcionamento da bomba respiratória ou toracoabdominal. Durante a fase inspiratória, o diafragma baixa, reduzindo-se a pressão intratorácica, o que favorece o enchimento cardíaco, uma vez que o sangue flui das altas para as baixas pressões. As variações intermitentes das pressões entre a cavidade torácica e abdominal, por efeito da subida e descida do diafragma aquando das fases expiratória e inspiratória, facilitam o retorno venoso do sangue que se encontra na região abdominal e membros inferiores, mecanismo de significativa importância no exercício dinâmico de características gerais. Nos exercícios realizados em apneia, este mecanismo encontra-se inibido.



Durante o exercício, a pressão arterial aumenta. Este aumento apresenta uma relação direta com intensidade do exercício e com o débito cardíaco. Aliás, o débito cardíaco é o principal fator explicativo para o aumento da pressão arterial em esforço. Este aumento é proporcional à intensidade do exercício, principalmente para a pressão arterial máxima ou sistólica. A pressão mínima ou diastólica tem tendência para não se alterar, elevar-se pouco ou mesmo diminuir ligeiramente em virtude da redução das resistências vasculares periféricas por efeito da vasodilatação na adaptação aguda aos exercícios dinâmicos de características gerais.

Os exercícios estáticos ou isométricos e que solicitam uma percentagem significativa da massa muscular ativa provocam um aumento das resistências vasculares periféricas globais com repercussão na pressão arterial sistólica e diastólica. O estudo da variação da pressão arterial para diferentes tipos de esforço, máximos, submáximos, supramáximos, de características locais ou gerais, constitui um importante indicador hemodinâmico na resposta adaptativa ao esforço.



**FIGURA 11** - O aumento da pressão arterial (PA) é proporcional à intensidade do exercício, principalmente para a pressão arterial sistólica (PAS). A pressão arterial diastólica (PAD) tem tendência para não se alterar, elevar-se pouco ou mesmo diminuir ligeiramente em virtude da redução das resistências vasculares periféricas por efeito da vasodilatação na adaptação aguda aos exercícios dinâmicos de características gerais. Nos exercícios estáticos e que solicitam uma percentagem significativa da massa muscular ativa, o aumento das resistências vasculares periféricas faz aumentar também a pressão arterial diastólica.

### Adaptações musculares

O músculo esquelético possui quatro características funcionais fundamentais. São elas a contractibilidade, a excitabilidade, a extensibilidade e a elasticidade.

O tecido muscular esquelético é *contráctil* porque tem capacidade para transformar energia química (ATP) em energia mecânica (tensão muscular). Fá-lo, consumindo energia e contraindo-se voluntariamente, o que por sua vez gera movimento. Esta é uma propriedade fisiológica do músculo esquelético ou voluntário (*contractibilidade*).

O tecido muscular esquelético é *excitável* porque responde à estimulação mediada pelo sistema nervoso na regulação da sua atividade. Esta é uma propriedade fisiológica do músculo esquelético ou voluntário (excitabilidade).

O tecido muscular esquelético é *extensível* ou *distensível* porque é estirável para além do seu comprimento de repouso. Esta propriedade está na base dos efeitos do treino de flexibilidade (“alongamentos”). Esta é uma propriedade fisiológica do músculo esquelético ou voluntário (distensibilidade).

As fibras musculares não se contraem de forma isolada e individualmente, mas fazem-no em grupo (unidades motoras).



O tecido muscular esquelético é *elástico* porque após o estiramento retoma o seu comprimento inicial (estado fisiológico de repouso). Esta é uma propriedade fisiológica do músculo esquelético ou voluntário (*elasticidade*).

A adaptação aguda do tecido muscular esquelético engloba um conjunto de modificações locais determinadas, em primeira análise, pela frequência e intensidade do impulso motor, estímulo com origem no sistema nervoso que, por seu turno, determina o número e tipo de fibras musculares solicitadas. As fibras musculares não se contraem de forma isolada e individualmente, mas fazem-no em grupo (unidades motoras). Uma unidade motora é constituída por um motoneurónio alfa, pelo axónio, pela junção neuromuscular ou placa motora e pelo conjunto de fibras musculares inervadas pelo conjunto neurónio/axónio. A unidade motora é, de facto, uma unidade funcional porque as fibras musculares não se contraem isoladamente. Fazem-no em grupo e segundo a “lei do tudo ou nada”. Quer isto dizer que quando a frequência e intensidade do impulso motor atingem o limiar de excitabilidade de determinada unidade motora, esta contrai-se completamente. Se a frequência e intensidade do impulso motor não atingem o limiar de excitabilidade da unidade motora, esta não se contrai (lei do tudo ou nada). Quando se aumenta o número de unidades motoras recrutadas simultaneamente, produz-se uma maior tensão muscular com uma também maior produção de trabalho mecânico ou força muscular. Logo, o tecido muscular esquelético desenvolve maiores ou menores tensões, mercê da solicitação de um número maior ou menor de unidades motoras em simultâneo, de acordo com o estado de excitação/inibição do motoneurónio  $\alpha$  a que aquelas unidades motoras correspondem.

De facto, a adaptação muscular aguda acompanha-se de alterações na frequência, no número e no tipo de fibras musculares recrutadas. Mas este recrutamento faz-se sob determinadas regras e de forma sequencial.



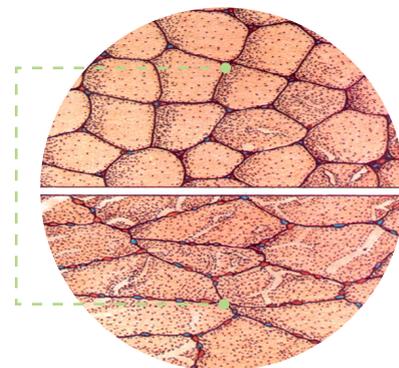
Os primeiros motoneurónios a serem recrutados são aqueles que necessitam de um estímulo menor para atingir um potencial de ação. Esta situação traduz-se pela ativação das fibras musculares do tipo I em primeiro lugar. Posteriormente, as do tipo IIa e IIb de modo sequencial, provocando uma somação (progressão) da força gerada até ao limite muscular voluntário máximo.

O recrutamento faseado de fibras musculares explica o facto de, para esforços musculares de baixa intensidade, serem as unidades motoras de limiar mais baixo e constituídas por fibras do tipo I a assegurar o trabalho muscular prolongado sem a interferência significativa dos mecanismos responsáveis pela fadiga muscular.

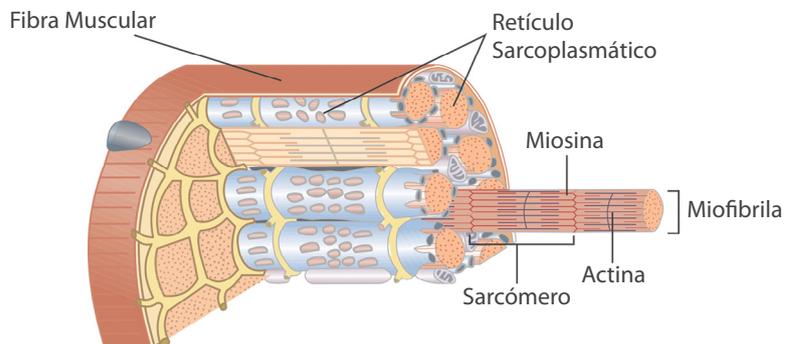
Outra adaptação aguda do tecido musculoesquelético ao esforço diz respeito ao fluxo sanguíneo local, o qual aumenta. A rede vascular muscular é extensa e mercê da vasodilatação. Influencia também os valores da pressão arterial (adaptações hemodinâmicas locais). Com efeito, o fluxo sanguíneo muscular pode aumentar vinte vezes comparativamente aos valores de repouso, com implicações no transporte de oxigénio e nutrientes, bem como na remoção de CO<sub>2</sub> e metabolitos. Estes ajustamentos ou adaptações agudas apresentam efeitos favoráveis na diferença arteriovenosa em oxigénio, consequência da sua maior extração e utilização periférica.

As adaptações musculares crónicas devem ser analisadas a nível estrutural e histoquímico. Permitem que o músculo treinado ou adaptado tolere maior carga mecânica (resistência mecânica do material) e que aumente também a sua capacidade de resposta funcional. Sob efeito de um stress mecânico, como é o exercício, a capacidade funcional do músculo vai diminuindo por agressão à sua arquitetura miofibrilar, com lesões ultraestruturais várias, nomeadamente nos sarcómeros (banda Z, com implicações na capacidade contráctil). As microlesões provocadas pelo exercício podem também afetar a membrana celular que, alterando a sua permeabilidade, induzem alterações responsáveis pelos desequilíbrios eletrolíticos e metabólicos. Estas lesões configuram uma entidade clínica designada *miopatia pós-esforço* que se acompanha de uma resposta inflamatória local e libertação de mediadores químicos da inflamação e da dor.

A hipertrofia muscular corresponde a uma adaptação crónica resultante do processo sistemático e repetitivo de agressão muscular (treino). A hipertrofia muscular no atleta treinado é o resultado do aumento do volume das células musculares, mas também do tecido conjuntivo, o que permite distribuir a carga por uma maior área de secção transversal do músculo. Por isso se diz que a capacidade para o músculo produzir força é proporcional à sua área em corte transversal. Tal constatação é verdadeira e inequívoca para os casos em que a hipertrofia se faz à custa dos elementos proteicos contrácteis (actina e miosina).



**FIGURA 13** - As fibras tipo I exibem como adaptação crónica, uma maior densidade mitocondrial, uma rede capilar mais extensa, um maior conteúdo em mioglobina e enzimas oxidativos, o que lhes permite aumentar a sua resposta e resistência funcional oxidativa. Não são, no entanto, tão hipertrofiáveis como as fibras tipo II.



A hipótese que postula um aumento do número de células por efeito do treino tem defensores e são várias as investigações que o provam, embora para certas correntes científicas da investigação sobre o tecido muscular esquelético, a hipótese da hiperplasia (aumento do número de células) ainda não foi inequivocamente provada, ficando como segura a hipótese da hipertrofia. Este tipo de adaptação hipertrófica é mais evidente nas fibras tipo II.

As fibras musculares tipo I exibem como adaptação crónica uma maior densidade mitocondrial, uma rede capilar mais extensa, um maior conteúdo em mioglobina e enzimas oxidativos, o que lhes permite aumentarem a sua resposta e resistência funcional oxidativa. No entanto, estas fibras não apresentam treinabilidade ao nível do equipamento metabólico anaeróbio e não desenvolvem adaptações tão hipertróficas como as verificadas para as fibras tipo II.

A “lesão” muscular provocada pelo treino, além do processo inflamatório transitório que provoca, estimula a libertação de fatores de crescimento responsáveis pela reparação dos tecidos lesados e pela síntese das proteínas contrácteis que assim são repostas, não raras vezes por excesso, mas transitório (sobrecompensação).



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Jack H. Wilmore, David Costill, W.Larry Kenney (2007). *Physiology of Sport and Exercise*, Human Kinetics

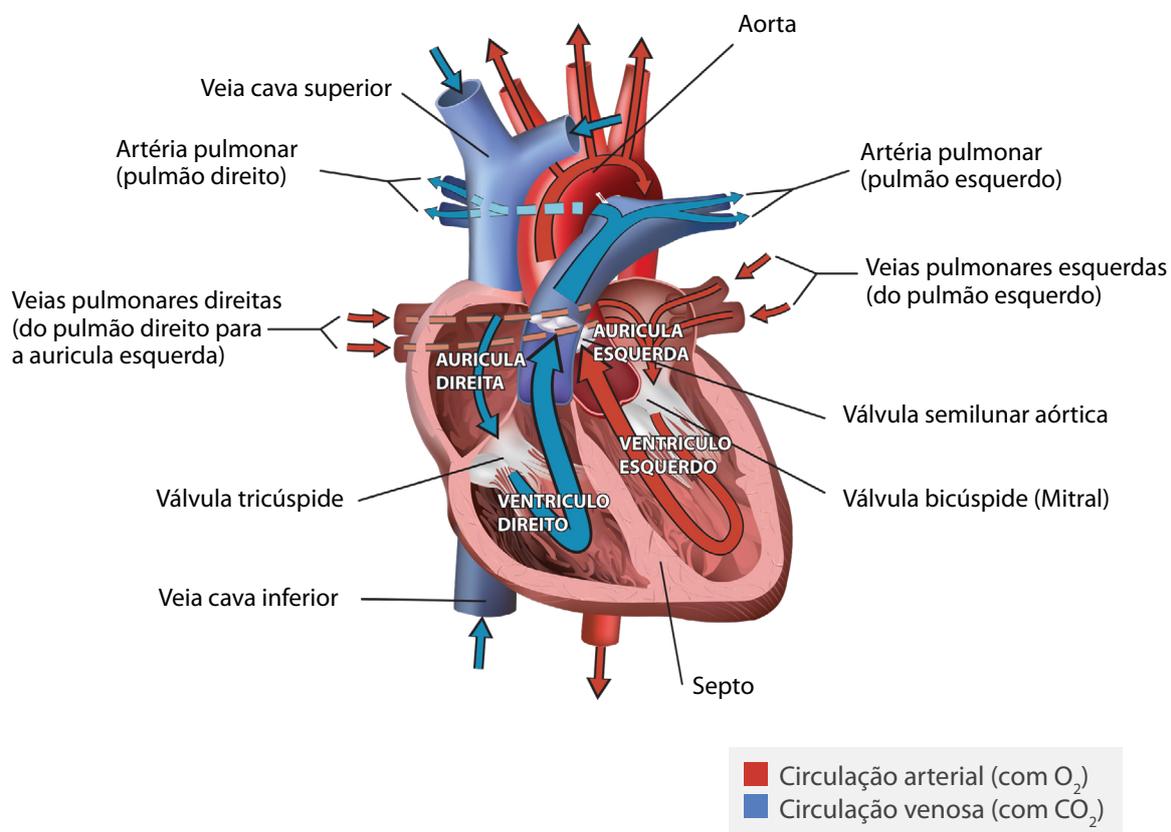
Per-Olof Astrand, Kaare Rodahl, Hans A. Dahl e Sigmund B. Stromme (2007). *Textbook of Work Physiology*. Human Kinetics, 2007

Seeley, R.Stephens,T. Tate, P (1997). *Anatomia e Fisiologia*. Lusodidáctica, 1.ª edição. Lisboa

Tudor Bompa, G. Gregory Haff (2009). *Theory and Methodology of Training*. 5.ª edição, Human Kinetics

William D. McArdle, Frank I. Katch e Victor L. Katch (2009). *Exercise Physiology: Nutrition, Energy, and Human Performance*. Lippincott Williams & Wilkins





# FICHA TÉCNICA

PLANO NACIONAL DE FORMAÇÃO DE TREINADORES  
MANUAIS DE FORMAÇÃO - GRAU II

## EDIÇÃO

INSTITUTO PORTUGUÊS DO DESPORTO E JUVENTUDE, I.P.  
Rua Rodrigo da Fonseca nº55  
1250-190 Lisboa  
E-mail: geral@ipdj.pt

## AUTORES

### CLÁUDIA MINDERICO

NUTRIÇÃO, TREINO E COMPETIÇÃO

### FEDERAÇÃO PORTUGUESA DE DESPORTO PARA PESSOAS COM DEFICIÊNCIA

DESPORTO PARA PESSOAS COM DEFICIÊNCIA

### JOÃO PAULO VILAS-BOAS

BIOMECÂNICA DO DESPORTO

### JOSÉ GOMES PEREIRA

FISIOLOGIA DO EXERCÍCIO

### LUÍS HORTA

LUTA CONTRA A DOPAGEM

### OLÍMPIO COELHO

PEDAGOGIA DO DESPORTO

### PAULO CUNHA

TEORIA E METODOLOGIA DO TREINO DESPOTIVO - MODALIDADES COLETIVAS

### RAÚL OLIVEIRA

TRAUMATOLOGIA DO DESPORTO

### SIDÓNIO SERPA

PSICOLOGIA DO DESPORTO

### TEOTÓNIO LIMA

ÉTICA E DEONTOLOGIA PROFISSIONAL

## COORDENAÇÃO DA PRODUÇÃO DE CONTEÚDOS

António Vasconcelos Raposo

## COORDENAÇÃO DA EDIÇÃO

DFQ - Departamento de Formação e Qualificação

## DESIGN E PAGINAÇÃO

BrunoBate-DesignStudio