



Ciência Básica

- 1 Bioenergética
- 2 Sistema cardiorrespiratório
- 3 Sistema neuromuscular: bases anatômicas e fisiológicas e adaptações ao treinamento
- 4 Sistema esquelético
- 5 Biomecânica dos exercícios de condicionamento
- 6 Respostas e adaptações do sistema endócrino ao treinamento
- 7 Nutrição



Bioenergética

T. JEFF CHANDLER

C. ERIC ARNOLD

Introdução

O movimento humano requer energia, e esta é vital para o desempenho esportivo. A bioenergética é o fluxo de energia nos sistemas biológicos, sendo uma consideração fundamental durante o exercício. Para qualquer atividade física, a energia precisa ser gerada e utilizada pelo corpo para a realização da tarefa. A fonte de energia influencia a capacidade do velocista para completar os 100 m rasos ou do maratonista para completar uma corrida. A compreensão do metabolismo, mais especificamente dos sistemas energéticos utilizados durante vários tipos de exercício, é crucial no desenvolvimento de programas eficazes de condicionamento específicos para uma atividade. Com um conhecimento básico de bioenergética, o estudante pode compreender por que as reações químicas que ocorrem nos músculos esqueléticos são ativadas e como a energia dessas reações abastece os músculos durante o exercício.

A bioenergética é o estudo das fontes de energia em organismos vivos e de como essa energia é finalmente utilizada.

Os alimentos que ingerimos contêm energia química. Nós armazenamos essa energia em nosso corpo nas formas de glicose, gordura e proteína. Ao final, essa energia química armazenada pode ser liberada para fornecer a energia necessária para produzir trifosfato de adenosina (ATP). O ATP é a fonte de energia mais importante no sustento da contração muscular durante o exercício.

A estrutura do ATP é composta de um grupamento adenina, um grupamento ribose e três grupamentos fosfato ligados (Fig. 1.1). A formação do ATP ocorre pela combinação de difosfato de adenosina (ADP) e fosfato inorgânico (Pi). Esse processo requer uma quantidade substancial de energia, que precisa ser captada do alimento que ingerimos.

O ATP é a molécula de alta energia responsável pela contração muscular e por outras reações metabólicas vitais no corpo humano.

O ATP é uma molécula de alta energia que armazena energia na forma de ligações químicas. A energia é liberada quando as ligações químicas que unem o ADP e o Pi para formar o ATP são quebradas (Fig. 1.2). A energia química derivada da quebra das ligações químicas fornece energia para a execução de vários tipos de exercício.

O metabolismo é o total da soma de processos **anabólicos** e **catabólicos**. Um processo catabólico quebra compostos maiores em compostos menores. No metabolismo, isso envolve a quebra de substâncias como o carboidrato com o propósito de fornecer combustível para os músculos durante o exercício. Uma reação anabólica forma substâncias maiores a partir de substâncias menores.

METABOLISMO = CATABOLISMO + ANABOLISMO.

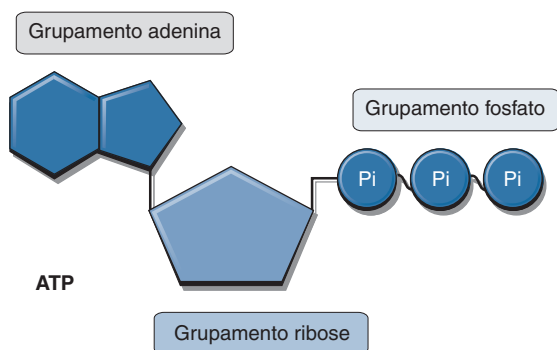


FIGURA 1.1 Estrutura básica do ATP. A energia é armazenada nas três ligações fosfato.

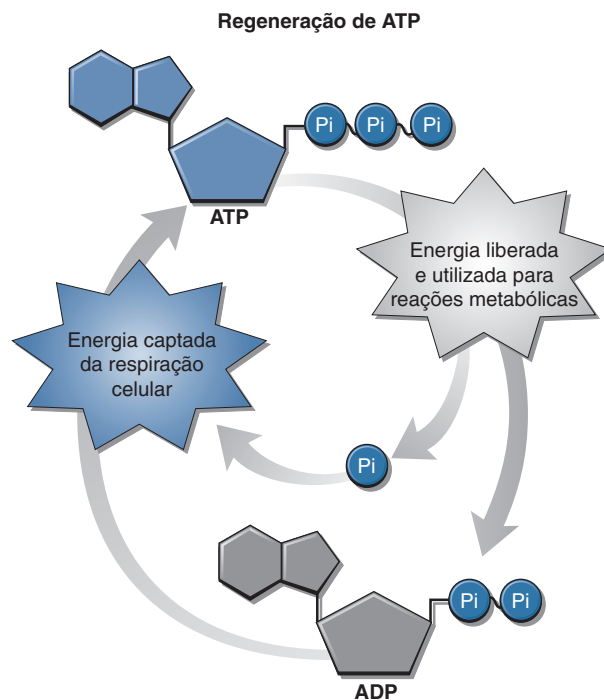


FIGURA 1.2 Regeneração do ATP. A energia é liberada quando o ATP é decomposto em ADP e Pi. O ATP é regenerado a partir do ADP, e a energia é captada do alimento.

ENZIMAS

As **enzimas** são moléculas estruturadas de proteínas, que aceleram ou facilitam certas reações químicas mediante a diminuição da energia de ativação de uma reação química (7). A energia de ativação é considerada como uma barreira de energia que precisa ser superada para que uma reação química ocorra (Fig. 1.3). As enzimas diminuem a **energia de ativação**, ou a quantidade de energia necessária para provocar uma reação química. Assim, as enzimas facilitam as reações químicas metabólicas. A enzima não se torna uma parte do produto, mantendo-se intacta.

Uma reação química é classificada como exergônica ou endergônica. Uma reação **exergônica** libera energia, e uma reação **endergônica** absorve energia do meio externo. Durante uma corrida de 100 m, o ATP é quebrado nos músculos, e a energia é tanto liberada (reação exergônica) quanto utilizada (reação endergônica) pelos músculos que são ativamente recrutados durante a atividade. Uma reação exergônica está ilustrada na Figura 1.4, onde $A \rightarrow B$ é uma reação descendente espontânea. Nesse exemplo, o nível de energia do reagente (A) (ATP) é maior do que o do(s) produto(s) (ADP + Pi) (7).

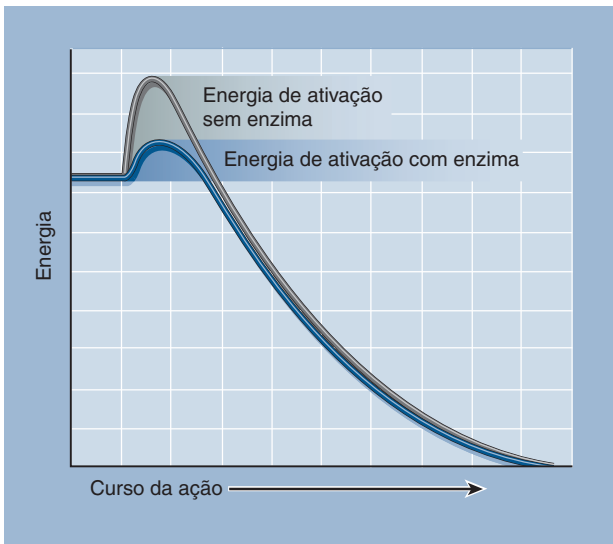


FIGURA 1.3 Energia de ativação. Uma enzima diminui a quantidade de energia que precisa ser superada para que ocorra uma reação química.

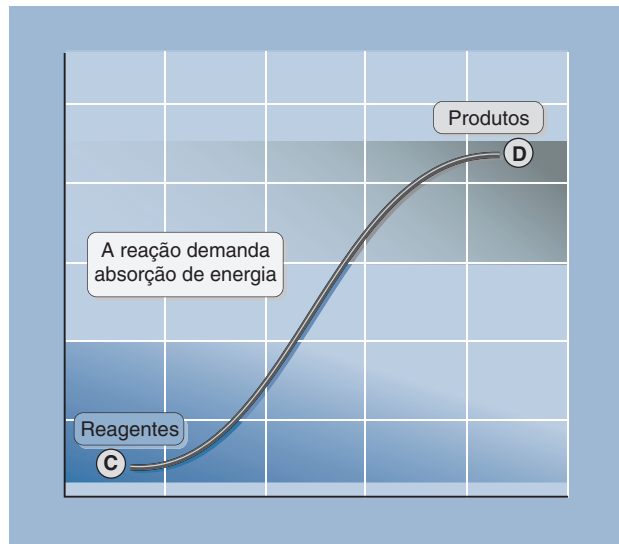


FIGURA 1.5 Reação química endergônica. Numa reação endergônica, o nível de energia do(s) produto(s) é maior que o do(s) reagente(s).

Uma reação endergônica está ilustrada na Figura 1.5, onde $C \rightarrow D$ é uma reação ascendente não-espontânea (7). Nesse exemplo, o nível de energia do(s) produto(s) é maior do que o do(s) reagente(s) (7). A transição $C \rightarrow D$ não ocorrerá a menos que uma enzima esteja presente para diminuir a energia de ativação (7). Assim, a energia de ativação funciona como uma barreira de energia para a reação química (7). O Quadro 1.1 compara uma ratoeira às reações exergônica e endergônica.

Metabolismo é uma série de reações químicas controladas por enzimas com o propósito de armazenar ou usar energia. O metabolismo (Fig. 1.6) começa com um substrato, que é o material inicial na reação. Em cada reação, o substrato sofre uma alteração química catalisada por enzimas e é modificado; os compostos modificados são chamados de intermediários. Na reação final, o composto resultante é chamado de produto.

Em uma série de reações metabólicas, uma das enzimas é geralmente chamada de enzima limitante. Uma **enzima limitante** é definida como a que catalisa

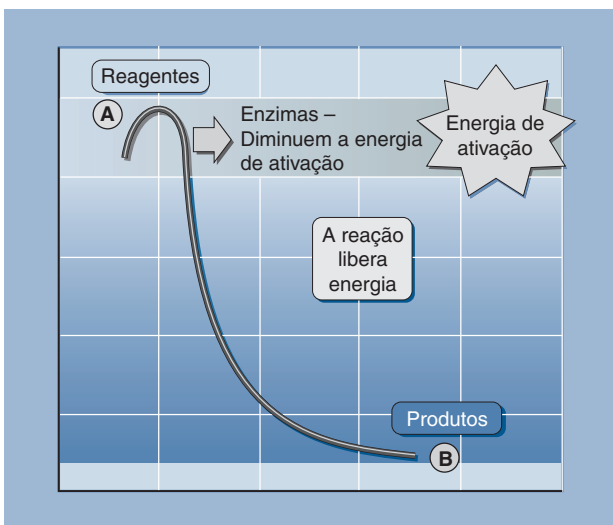


FIGURA 1.4 Reação química exergônica. Numa reação desse tipo, o nível de energia do(s) reagente(s) é maior que o do(s) produto(s).

QUADRO 1.1 ANALOGIA DA RATOEIRA

A seguinte reação bioquímica tem papel decisivo na contração muscular: $ATP \rightarrow ADP + P_i + \text{energia}$ (ATPase é a enzima que catalisa essa reação).

Durante a contração muscular, as ligações que unem os grupamentos fosfato na molécula de ATP são quebradas e desprendem energia. A liberação de energia pelas ligações fosfato é denominada exergônica. A quebra das ligações libera essa energia (exergônica) e abastece a contração muscular (endergônica). A ratoeira pode ser utilizada para ilustrar tais reações bioquímicas. Puxando-se a mola da ratoeira para trás, gera-se energia armazenada na mola; quando esta é solta, ocorre uma reação exergônica. A reação endergônica é ilustrada pelo estalo da ratoeira (a armadilha consumindo a energia).

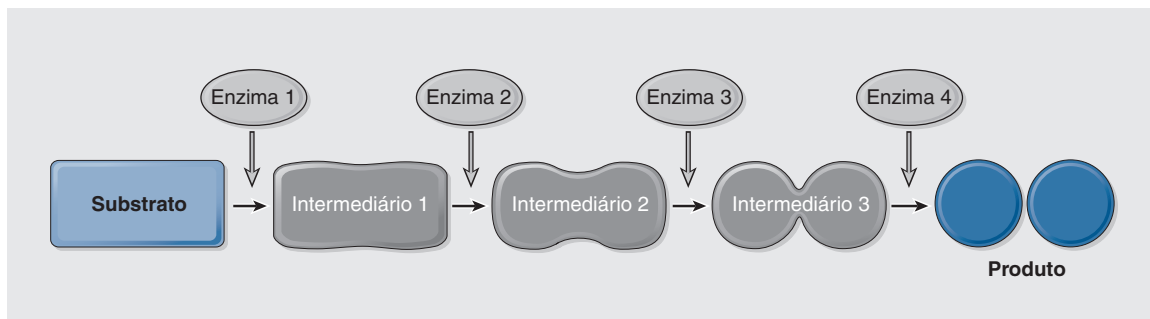


FIGURA 1.6 Metabolismo. Nesta rota metabólica, as enzimas facilitam as reações químicas que convertem um substrato em intermediários e, finalmente, em um produto.

a etapa mais lenta em uma série de reações químicas (Fig. 1.7). Geralmente, a enzima limitante catalisa a primeira etapa. Para estimular ou inibir uma série de reações, uma substância precisa afetar a reação limitante. Isso é conhecido como um sistema de *feedback* negativo, porque a alteração que ocorre é no sentido contrário ao que estava acontecendo antes do *feedback*.

As enzimas são influenciadas por alterações no pH e na temperatura. As alterações no pH podem influenciar enzimas essenciais, que controlam as rotas metabólicas. Durante o exercício de alta intensidade, o pH diminui dentro do músculo, o que pode afetar a função enzimática e desacelerar a glicólise, reduzindo, assim, a quantidade de ATP disponível para a contração muscular.

A temperatura pode ter um efeito importante nas reações enzimáticas. Tal efeito é estudado alterando-se a temperatura em múltiplos de 10°C, constituindo o **efeito Q10**. O aumento da temperatura em 10°C duplica a velocidade da reação enzimática. Numa perspectiva prática, aquecer os músculos antes de iniciar uma atividade física permite ao atleta aproveitar o efeito Q10.

A “CRIAÇÃO” DE ENERGIA QUÍMICA

De onde vem a energia? A energia não é criada nem destruída, mas pode ser convertida de uma forma para outra. Esse conceito reforça a primeira lei da termodinâmica, a ciência física que lida com a troca de energia, em que a energia é “convertida” de uma forma para outra. A primeira lei da termodinâmica, também conhecida como lei da conservação de energia, pode ser aplicada para a contração muscular. Ela determina que o aumento da energia interna de um sistema é igual à quantidade de energia adicionada a este pelo aquecimento mais a quantidade adicionada na forma de trabalho realizado no sistema. Durante o exercício, a energia química, na forma de ATP, é transformada em energia mecânica, na forma de contração muscular. Sem a energia química da quebra do ATP, a energia mecânica como contração muscular não poderia ocorrer.

A origem da energia química que assimilamos em nosso corpo é um processo anabólico chamado fotossíntese. Na fotossíntese, as plantas verdes, na presença

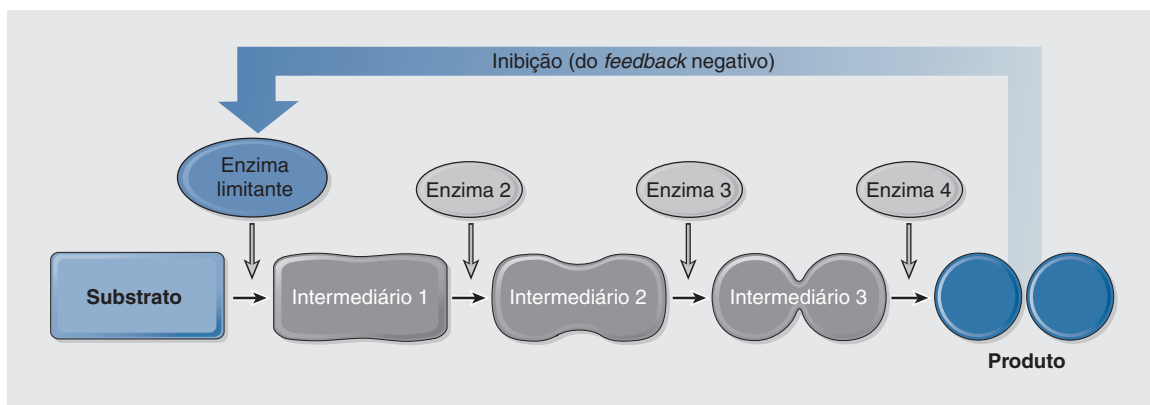


FIGURA 1.7 Inibição de uma reação química. Uma enzima limitante é inibida pelo produto final da reação por meio do mecanismo de *feedback* negativo.

da luz solar e da clorofila, absorvem dióxido de carbono e água e os convertem em carboidrato (um composto de carbono/hidrogênio/oxigênio), e o oxigênio é liberado na atmosfera. É essa reação que converte a energia solar na energia química de que precisamos para viver e que também reabastece de oxigênio a atmosfera. Esse composto de carboidrato formado nas plantas verdes é a forma básica de energia necessária para os seres humanos. Sua estrutura de carbono pode ser modificada por meio de reações anabólicas para formar gorduras, que também contêm carbono, hidrogênio e oxigênio, e proteínas, que contêm carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio.

SISTEMAS ENERGÉTICOS

Três sistemas energéticos distintos, porém fortemente integrados, operam juntos, de forma coordenada, para fornecer energia para a contração muscular: o sistema de fosfocreatina, o sistema glicolítico anaeróbico e o sistema oxidativo. Os sistemas de fosfocreatina e glicolítico anaeróbico fornecem ATP a uma taxa alta para sustentar a contração muscular durante explosões curtas de exercício de alta intensidade, tais como um *sprint* de 200 m. A quantidade de ATP suprida por estes, contudo, é limitada.

Três sistemas energéticos fornecem ATP para o trabalho muscular: o sistema de fosfocreatina, o sistema glicolítico anaeróbico e o sistema oxidativo.

O sistema oxidativo predomina durante exercícios de intensidade baixa a moderada, quando há oxigênio disponível para o músculo. Em intensidades de exercício mais baixas, como durante uma caminhada, a demanda de ATP é baixa, e a energia pode ser suprida

a uma taxa elevada o suficiente pelos sistemas energéticos oxidativos (19). Em intensidades de exercício mais altas, a demanda de ATP é alta, e a energia não pode ser suprida somente pelo metabolismo oxidativo (19). Portanto, o sistema glicolítico anaeróbico deve preencher essa lacuna entre o sistema de fosfocreatina e o oxidativo. Durante o exercício de alta intensidade, o suprimento de ATP deve ser derivado dos sistemas energéticos de fosfocreatina e glicolítico anaeróbico.

É importante notar que todos os três sistemas energéticos estão ativos em um dado ponto no tempo, mas um sistema predominará com base nas condições desse tempo (Tabela 1.1). Cada sistema energético opera como um *dimmer*, no sentido de que não está completamente desligado, mas em transição de um sistema para o próximo, com base nas demandas de energia do músculo durante o exercício. A Figura 1.8 traz uma representação gráfica da sobreposição e da duração dos principais sistemas energéticos. O Quadro 1.2 oferece um resumo da transição de um sistema para o seguinte.

A intensidade do exercício é a variável mais importante relacionada a qual sistema energético é ativado para produzir ATP para o trabalho muscular.

A intensidade, a duração e a modalidade de exercício são decisivas na determinação de qual sistema energético predominará durante o exercício, embora a intensidade do exercício tenha o papel mais importante na indicação de qual será ativado.

A intensidade do exercício é prescrita utilizando-se uma porcentagem do consumo máximo de oxigênio ($\% \dot{V}O_{2\text{máx}}$). O consumo máximo de oxigênio é definido como a maior quantidade de utilização de oxigênio que ocorre durante o exercício dinâmico e é medido em mL/kg/min ou L/min. Por exemplo, pode-se prescrever para um indivíduo um exercício que demande 70% do seu $\dot{V}O_{2\text{máx}}$.

TABELA 1.1 Os sistemas energéticos e suas contribuições aproximadas para várias durações de exercício em intensidade máxima (1)	
Sistema energético	Duração
Sistema de fosfocreatina	0–10 s
Sistema de fosfocreatina e sistema glicolítico (lento)	10–30 s
Sistema glicolítico (rápido)	30 s–2 min
Sistema glicolítico (rápido) e sistema oxidativo	2–3 min
Sistema oxidativo	< 3 min e repouso

Nota: Em intensidade submáxima, cada sistema pode suprir ATP por um período mais longo. A recuperação de todos os tipos de gasto energético é aeróbia.

Fonte: Adaptada com permissão de Bassett DR Jr., Howley ET. Limiting factor for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Med Sci Sports Exerc* 2000;32(1):70-84.

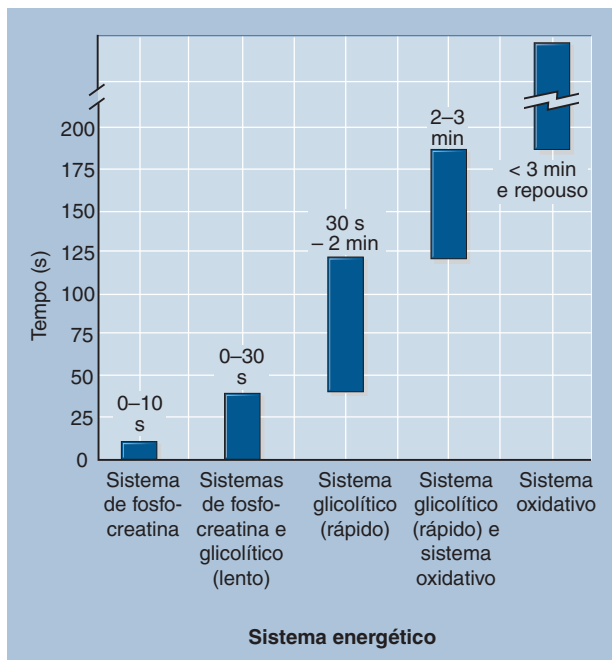


FIGURA 1.8 Os sistemas energéticos e suas contribuições aproximadas a várias durações de exercício em intensidade máxima. Note a sobreposição e a duração dos vários sistemas energéticos.

Entender como um sistema energético específico é convertido durante várias atividades e/ou eventos esportivos pode ajudar o treinador de força a desenvolver programas metabolicamente específicos.

O sistema de fosfocreatina

O ATP é quebrado para liberar energia (um processo catabólico) e pode ser regenerado a partir de suas par-

tes componentes: um grupamento adenosina e três **grupamentos fosfato**. Inversamente, é necessário energia para adicionar um grupamento fosfato a um grupamento adenosina, o que é um processo anabólico. O Quadro 1.3 lista as características do sistema de fosfocreatina.

Quando a energia muscular é necessária por um curto período, o sistema de fosfocreatina é capaz de suprir a maior parte do ATP necessário. Esse sistema também suprirá energia nos estágios iniciais de todos os tipos de exercício. O ATP é produzido no sistema de fosfocreatina anaerobiamente (sem a presença de oxigênio). Três reações básicas ocorrem no sistema de fosfocreatina (Fig. 1.9). Quando a atividade física inicia, o ATP armazenado nos músculos é utilizado. Todas as atividades são iniciadas anaerobiamente, já que se leva tempo para se começar a produzir ATP aerobiamente. O sistema de fosfocreatina pode regenerar ATP anaerobiamente, permitindo que a atividade anaeróbia prossiga em um nível máximo ou próximo do máximo, mas somente por um curto período.

REAÇÃO DA MIOSINA ATPase

A primeira reação no sistema de fosfocreatina é a quebra de ATP em ADP + Pi na presença da enzima miosina ATPase. Essa reação produz energia para a contração muscular anaerobiamente. Parte do ATP é armazenada nos músculos para realizar essa tarefa. Conforme mencionado, a iniciação de toda atividade depende desse ATP armazenado. Seguindo-se à quebra inicial de ATP, há duas reações que regeneram ATP anaerobiamente. Essas reações são geralmente denominadas com base nas enzimas que as catalisam: a reação creatinacina e a reação miocina.

QUADRO 1.2 TRANSIÇÃO DO SISTEMA ENERGÉTICO

O recrutamento e/ou a ativação dos sistemas energéticos durante o exercício são análogos a um *dimmer* que controla o nível de iluminação de uma sala. O sistema energético de fosfocreatina é o primeiro sistema energético recrutado, seguido pela glicólise anaeróbia e pela fosforilação oxidativa (p. ex., metabolismo aeróbio). O *dimmer* fornece mais luz à medida que o botão é girado para cima e menos luz conforme é girado para baixo. Essa relação aplica-se a todos os sistemas energéticos – de fosfocreatina, de glicólise anaeróbia e oxidativa. À medida que o exercício progride, ocorre a transição de um sistema energético para o seguinte, de modo a fornecer o ATP necessário para suprir a energia de que os músculos precisam para trabalhar. Assim que um sistema vai-se tornando ineficiente, o próximo começa a assumir a demanda de produção de energia.

QUADRO 1.3 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE FOSFOCREATINA

1. Envolve apenas uma reação química.
2. É catalisado pela enzima creatinacina (CK).
3. Sua reação química é muito rápida.
4. É gerado um ATP por molécula de fosfocreatina.
5. A reação dura de 5 a 10 s em intensidade máxima.
6. É anaeróbio.
7. A fadiga está associada com a depleção de fosfocreatina.
8. É o sistema energético dominante em eventos de velocidade e potência.

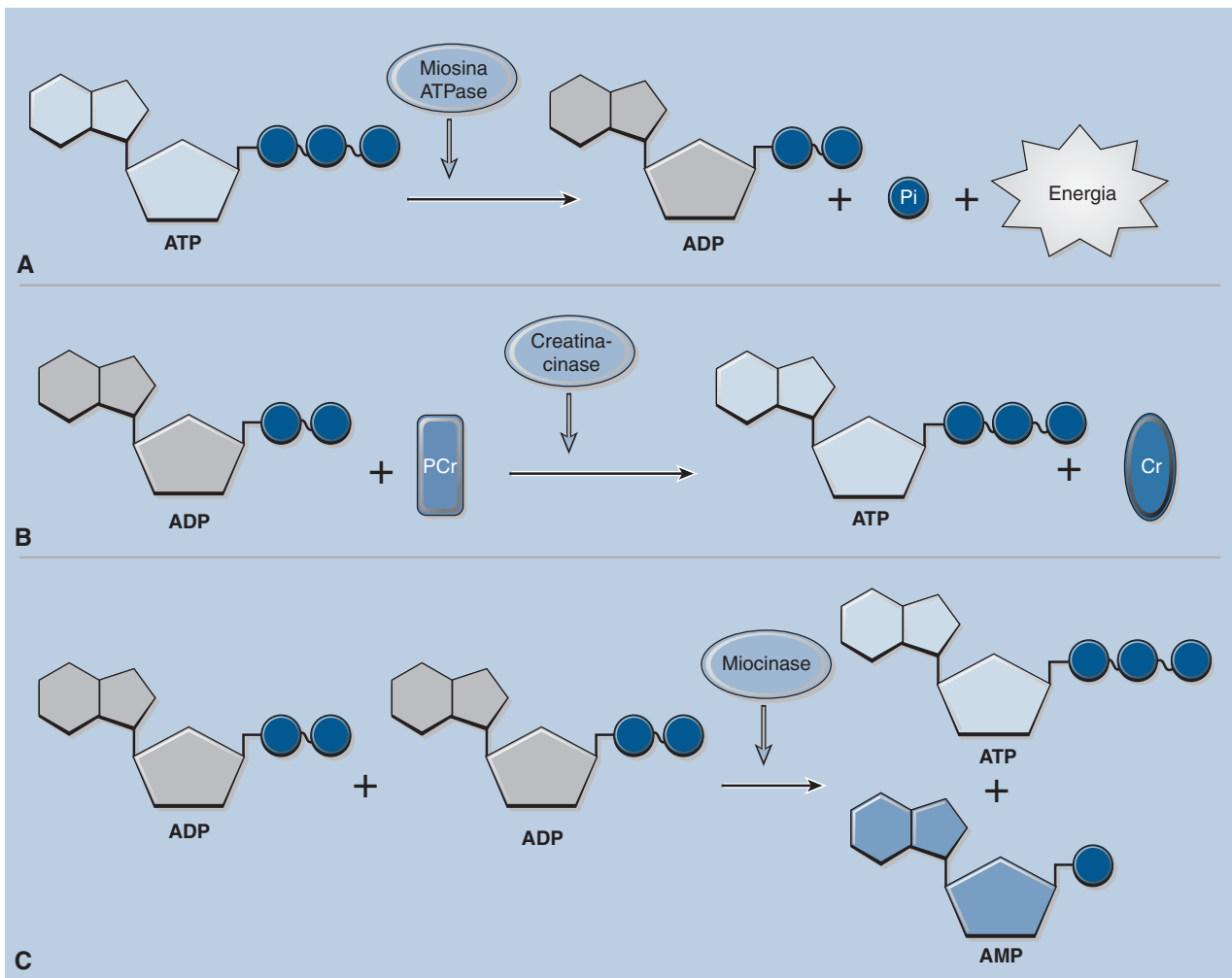


FIGURA 1.9 Reações do sistema fosfagênio. A. Reação da miosina ATPase; B. reação da creatina-cinase; e C. reação da miocinase.

REAÇÃO DA CREATINACINASE

Na reação da creatina-cinase, a fosfocreatina é combinada com ADP na presença da enzima creatina-cinase para formar um novo ATP.

REAÇÃO DA MIOCINASE

Uma segunda reação que pode regenerar ATP anaerobiamente por um curto período é a reação da miocinase, que o regenera a partir de dois ADPs. Essa reação resulta na produção de uma molécula de ATP e uma molécula de monofosfato de adenosina (AMP). A produção do AMP é importante para o controle do metabolismo, já que ele é um potente estimulador da glicólise.

Em suma, o ATP utilizado no sistema de fosfocreatina inicia com a energia proveniente dos carboidra-

tos (ou das gorduras, ou das proteínas), com a energia do alimento armazenada nas ligações químicas entre a adenosina e o fosfato (ver Fig. 1.2). O ATP é quebrado para fornecer energia e pode também ser “recarregado” anaerobiamente. Quando o ATP é regenerado, a energia é armazenada. Quando é utilizado para energia, esta é liberada. O ATP é a fonte final de energia para a contração muscular.

Regulação da produção de energia

A **carga energética da célula (razão ATP/ADP)** tem um papel essencial na regulação do sistema de fosfocreatina. A carga energética da célula muscular fornece informações sobre a quantidade de energia (ATP) disponível no músculo para sustentar a atividade. Uma concentração aumentada de ADP na célula estimula a

creatinacinase, a enzima essencial de controle regulador do sistema de fosfocreatina. Um aumento no ATP intracelular inibe essa enzima, diminuindo assim a taxa de reação enzimática. Portanto, níveis altos de ADP estimulam a creatinacinase, que acelera a quebra de PCR + ADP → ATP + Cr e fornece energia para o exercício de alta intensidade e curta duração. Níveis altos de ADP no músculo refletem que o ATP está sendo extensivamente utilizado por ele para fornecer energia para gerar força, como ocorre em uma corrida de 200 m. Níveis baixos de ADP no músculo refletem que o ATP não está sendo utilizado em um nível alto, como acontece em uma caminhada lenta.

A ressíntese pós-exercício de fosfocreatina ocorre entre 2 e 3 min de recuperação (19), mediante o transporte energético de fosfocreatina. Esse processo envolve o transporte de Cr e PCR entre os locais de utilização (p. ex., miofibrilas) e os locais de regeneração (p. ex., mitocôndrias). Quando estiver treinando especificamente a recuperação do sistema de fosfocreatina, pode ser vantajoso para o atleta realizar *sprints* de 37 m para permitir 2-3 min de recuperação, a fim de otimizar a ressíntese de fosfocreatina (12). Isso também se aplica ao treinamento de força, quando um atleta está treinando para recuperação do sistema de fosfocreatina. Permitir um tempo de recuperação adequado entre os *sprints* e as séries de força disponibiliza mais ATP pela reação química de fosfocreatina.

O sistema glicólico

O sistema glicolítico, ou glicólise anaeróbia, envolve a quebra de carboidrato anaerobiamente para produzir energia. As gorduras e as proteínas não podem ser metabolizadas nesse sistema. O carboidrato (substrato) provém da glicose sanguínea ou do glicogênio estocado no fígado ou nos músculos. Os dois tipos de glicólise são a glicólise rápida e a glicólise lenta (Fig. 1.10). A glicólise lenta é, às vezes, chamada “glicólise aeróbia” (7), porque o piruvato é convertido em acetil-CoA na presença de oxigênio e em ácido lático na ausência de oxigênio. O Quadro 1.4 fornece uma analogia para as fases de investimento e de geração de ATP na glicólise.

A glicólise rápida quebra a glicose (CHO) em piruvato e, finalmente, em ácido lático anaerobiamente, com a produção líquida de dois ATPs. Se o glicogênio for o substrato, um ATP é poupado, e há uma produção líquida de três ATPs.

A glicólise lenta é o caminho que o piruvato toma se há oxigênio suficiente para o metabolismo aeróbio. Na presença de oxigênio, o piruvato é convertido, por uma série de reações bioquímicas, em acetil-CoA, o primeiro composto no ciclo de Krebs. A glicólise lenta prepara o composto de carbono (piruvato) para en-

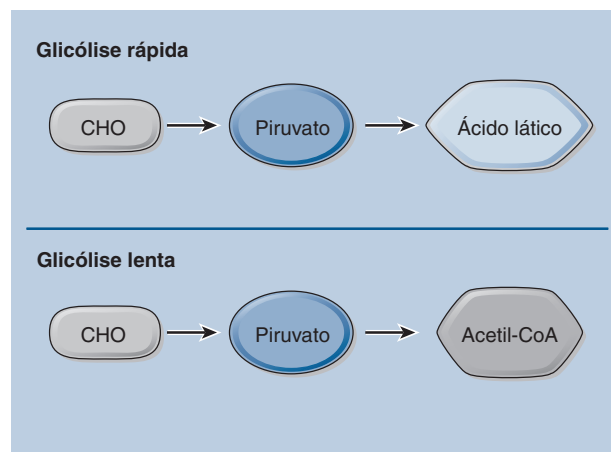


FIGURA 1.10 Reações das glicólises rápida e lenta. O piruvato é convertido em ácido lático na ausência de oxigênio e em acetil-CoA no ciclo de Krebs, na presença de oxigênio. CHO = carboidrato.

trar na rota aeróbia. As reações glicolíticas acontecem, na maioria dos casos, no citoplasma da célula, o meio aquoso entre a membrana celular e os núcleos. A reação final na glicólise lenta, do piruvato para o acetil-CoA, ocorre nas mitocôndrias.

A glicólise anaeróbia produz um ganho líquido de dois ATPs, mas tem a capacidade de agir quando não há O₂ presente.

A enzima de controle regulador do sistema glicolítico é a fosfofrutocinase (PFK). Ela é a enzima limitante que controla a taxa de glicólise. A PFK é inibida por

QUADRO 1.4 FASES DE INVESTIMENTO E DE GERAÇÃO DE ATP NA GLICÓLISE

Nas fases iniciais da glicólise anaeróbia, dois ATPs precisam ser investidos no sistema, e quatro ATPs são produzidos ao final, para um ganho líquido de dois ATPs. Esse investimento de ATPs é como um investimento em um certo tipo de ações (p. ex., da IBM), e a geração de ATP é como um lucro obtido desse estoque. Assim, um total líquido de dois ATPs é gerado do metabolismo de uma molécula de glicose na glicólise. A glicólise é semelhante a um investimento em ações em que você investe R\$ 200,00 e recebe de volta R\$ 400,00 ao final do trimestre. Portanto, você tem um ganho líquido de R\$ 200,00, ou o dobro do que você tinha quando investiu inicialmente nas ações.

níveis altos de ATP, fosfocreatina, citrato, ácidos graxos livres e um pH marcadamente reduzido. É estimulada por concentrações altas de fosfato inorgânico (Pi), ADP, fosfato e amônia, e é fortemente estimulada pelo AMP. O Quadro 1.5 resume as características básicas do sistema glicolítico.

O sistema oxidativo

O sistema oxidativo oxida ou “queima” aerobiamente carboidratos (ou outras estruturas que contenham carbono obtidas da gordura e da proteína). Os combustíveis preferidos para o metabolismo aeróbio são os carboidratos e as gorduras, mas a proteína pode ser **desaminada** pela remoção do grupamento amino, o componente nitrogenado do composto carbono/hidrogênio/oxigênio/nitrogênio, e pela oxidação do composto carbono/hidrogênio/oxigênio remanescente. O sistema oxidativo é um processo complexo que envolve duas partes: o ciclo de Krebs (ciclo do ácido cítrico) (Fig. 1.11) e o sistema de transporte de elétrons (STE) (Fig. 1.12).

O ciclo de Krebs é uma série complexa de reações metabólicas controladas por enzimas. Localiza-se nas mitocôndrias, o local de produção aeróbia de ATP, e tem papel essencial na oxidação de carboidratos, gorduras e proteínas. A cadeia de transporte de elétrons está localizada na membrana interna das mitocôndrias e é responsável pela produção aeróbia de ATP. O ciclo de Krebs gera elétrons na forma de íons de hidrogênio transportados pelo STE por carregadores de elétrons (FAD^+ ou NAD^+). É no STE que muitas moléculas de

ATP são geradas. As reações metabólicas aeróbias ocorrem nas mitocôndrias, organelas dentro da membrana celular no citoplasma. Uma molécula de glicose oxidada produz aerobiamente 36 a 38 ATPs (7).

O sistema aeróbio pode produzir muito mais ATPs por molécula do que o sistema anaeróbio, mas não pode produzir ATP rapidamente: a intensidade deve permanecer em estado de equilíbrio ou abaixo dele.

As gorduras também podem ser oxidadas aerobiamente para formar ATP. Primeiro, elas são quebradas em glicerol e ácidos graxos livres. Os três ácidos graxos livres entram nas mitocôndrias e, mediante um processo chamado betaoxidação, são degradados em acetil-CoA e átomos de hidrogênio. O acetil-CoA entra no ciclo de Krebs diretamente como composto intermediário.

Embora não seja uma fonte de energia preferida, a proteína pode ser quebrada e oxidada aerobiamente. Primeiro, as proteínas são catabolisadas em seus componentes menores, os aminoácidos. Os aminoácidos podem então ser desaminados. A porção carbono/hidrogênio/oxigênio do composto pode ser convertida em glicose por meio da gliconeogênese, piruvato e outros intermediários do ciclo de Krebs. A contribuição dos aminoácidos para a produção de energia é mínima para atividades anaeróbias mas pode contribuir com até 18% das demandas de energia para o exercício aeróbio (3). Os aminoácidos de cadeia ramificada são os principais aminoácidos utilizados pelo músculo esquelético para produção de energia. O resíduo de nitrogênio, a porção amino do aminoácido, é eliminado do corpo como uréia ou amônia. A amônia contribui potencialmente para a fadiga (18).

O controle do sistema oxidativo está relacionado a vários fatores. Primeiro, quantidades adequadas de FAD^+ devem estar presentes para transportar íons de hidrogênio para dentro do STE. Uma redução de FAD^+ e NAD^+ leva a uma diminuição da taxa de metabolismo oxidativo. O STE é inibido por concentrações altas de ATP e estimulado por concentrações altas de ADP (7). O Quadro 1.6 resume as características do sistema oxidativo.

QUADRO 1.5 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA GLICOLÍTICO

1. De suas 18 reações químicas, seis são repetidas.
2. Abrange 12 compostos químicos e 11 enzimas.
3. A fosfofrutocinase (PFK) é a enzima limitante.
4. É rápido, mas não tanto quanto o sistema de fosfocreatina.
5. Utiliza dois ATPs, se o substrato for a glicose, e três, se for o glicogênio.
6. É anaeróbio.
7. Funciona por 1 a 2 min em alta (não máxima) intensidade.
8. A fadiga associada com pH diminuído reflete um aumento em íons de hidrogênio.
9. É o sistema energético predominante em exercício não-máximo de alta intensidade (p. ex., uma corrida de 800 m).

LACTATO

O ácido láctico resultante da glicólise rápida é imediatamente tamponado e convertido em um sal chamado lactato. Embora o ácido láctico seguramente esteja associado com a fadiga, o lactato torna-se um substrato que pode ser reconvertido em piruvato e utilizado no

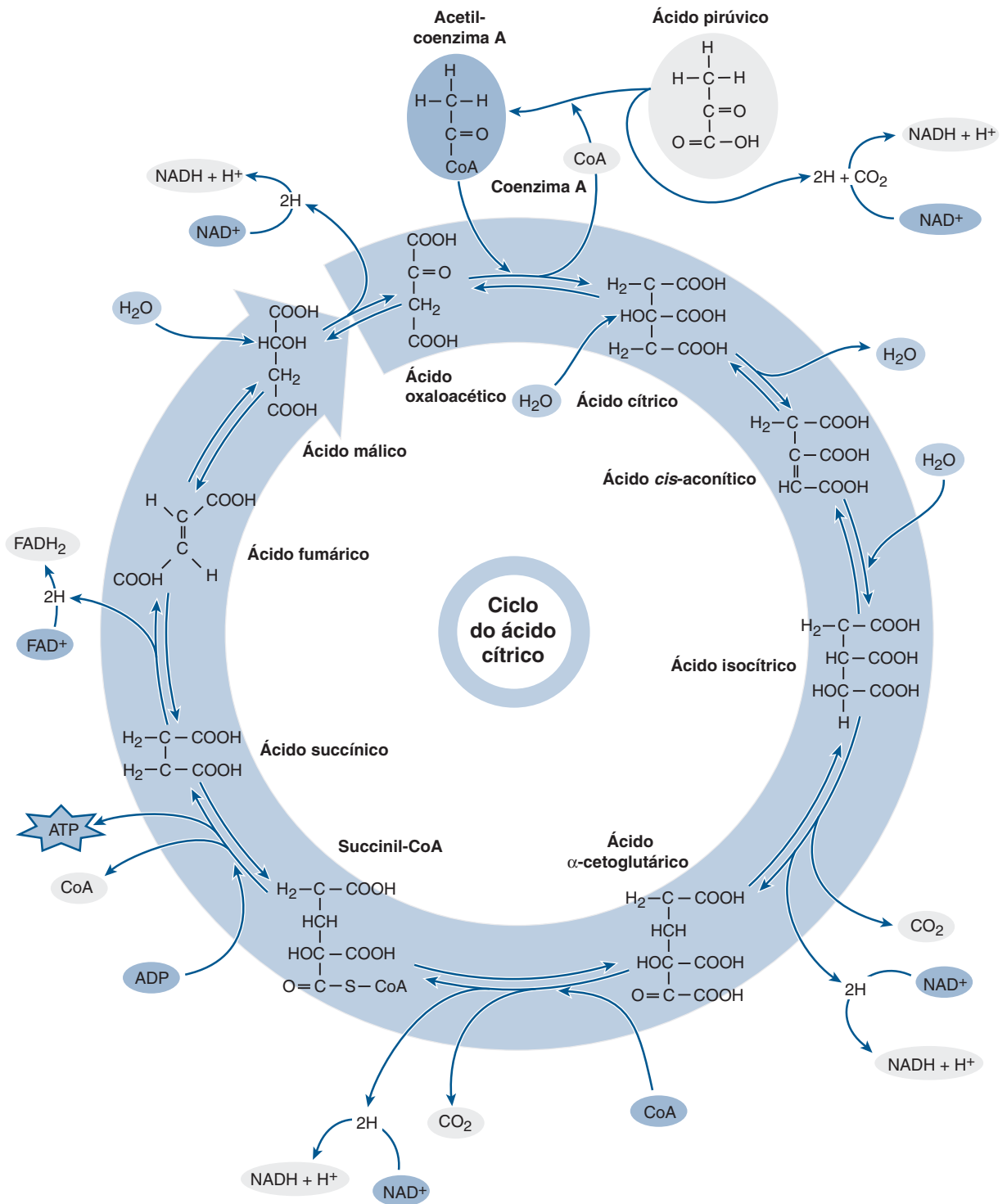


FIGURA 1.11 Ciclo de Krebs. Também conhecido como ciclo do ácido cítrico, é uma série complexa de reações metabólicas controladas por enzimas.

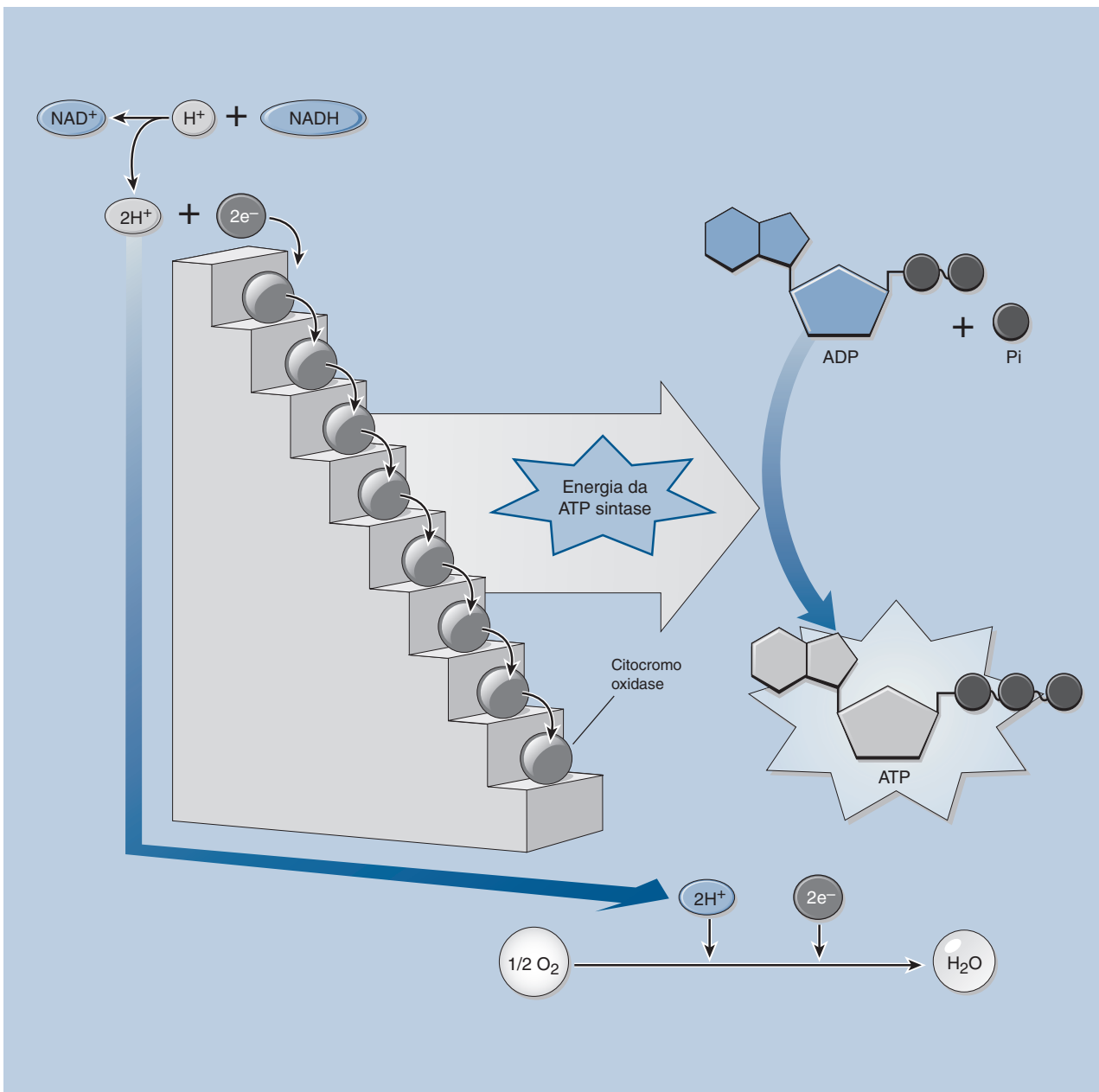


FIGURA 1.12 Sistema de transporte de elétrons (STE), responsável pela produção aeróbica de ATP.

ciclo de Krebs, particularmente no coração e nas fibras musculares de contração lenta (3,8).

O ácido láctico produzido durante o exercício de alta intensidade é rapidamente convertido em lactato. O lactato é um composto metabólico útil que pode ser transportado para o fígado e transformado em glicose em um processo chamado "glicogênese". Pode ser utilizado pelo corpo como combustível durante a recuperação do exercício.

O lactato já foi percebido como um resíduo metabólico; hoje, no entanto, é considerado uma importante fonte de combustível. A hipótese do transporte de lactato explicava que o lactato tinha uma importante função na distribuição da energia do carboidrato entre vários tecidos e compartimentos celulares (6). A hipótese original do transporte de lactato foi depois renomeada para "transporte de lactato célula-célula" (4), que envolve o transporte do lactato produzido por fibras musculares de contração rápida (tipo IIx), durante



Pergunta e resposta da área

Sempre ouvi dizer que o ácido láctico causa fadiga. É verdade?

O ácido láctico é um subproduto do metabolismo anaeróbio. O exercício anaeróbio é, por definição, de alta intensidade, e o produto final será o ácido láctico. Também por definição, o exercício anaeróbio de alta intensidade levará à fadiga rapidamente. De certo modo, a produção de ácido láctico é paralela à fadiga. Também pode ser que suas moléculas interfiram na contração muscular eficiente. O ácido láctico é também responsável pela queima imediata

no músculo que está sendo exercitado em uma intensidade alta. Essa queima não deve ser confundida com a dor muscular tardia que ocorre ao longo das 24 a 48 horas seguintes, a qual não se deve ao ácido láctico. O ácido láctico produzido é rapidamente tamponado em lactato. O lactato pode ser transportado para o fígado e convertido em glicose. Ele é uma fonte de energia útil para recuperação do exercício anaeróbio intenso.

o exercício, para fibras musculares de oxidação lenta (tipo 1). O lactato produzido pelas fibras musculares de oxidação rápida é transportado diretamente para as fibras musculares de contração lenta adjacentes, onde ocorre a oxidação. Algo em torno de 75 a 80% do lactato é descartado pela oxidação, e o restante é convertido em glicose ou glicogênio, em um processo chamado glicogênese (5). Durante esse processo, o composto deixa as fibras musculares de contração rápida, circula pelo sangue e é distribuído para o fígado, onde ocorre a formação de glicose, a partir de não-carboidratos.

O lactato sanguíneo pode ser utilizado como teste de laboratório para prever o desempenho de resistência. O teste usual incorporado para estimar a velocidade máxima em estado de equilíbrio é o limiar de lactato. Para determiná-lo, um sujeito corre em uma esteira ergométrica em várias velocidades de corrida, em diferentes estágios, até não conseguir mais continuar. Durante cada estágio,

obtem-se uma amostra de seu sangue para fornecer uma medida da concentração de lactato sanguíneo. O limiar de lactato (LL) representa o ponto em que o lactato sanguíneo começa a aumentar de modo não-linear, em uma intensidade de exercício específica (Fig. 1.13).

O limiar de lactato é um fator importante no desempenho. Se dois atletas participantes de um evento aeróbio tiverem o mesmo $\dot{V}O_{2max}$, o atleta com o maior limiar de lactato provavelmente vencerá a competição.

A velocidade de corrida em que ocorre o limiar de lactato é utilizada como um preditor de desempenho (1). A medida da velocidade de corrida máxima em estado de equilíbrio é útil na predição do sucesso em eventos do gênero, em distâncias de 3 km até a maratona (8-10,14-16).

QUADRO 1.6 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA OXIDATIVO

1. Abrange 124 reações químicas.
2. Contém 30 compostos e 27 enzimas.
3. As enzimas limitantes são PFK, ID e CO.
4. Opera lentamente.
5. Um ATP a menos é produzido se a glicose for o substrato, comparada ao glicogênio.
6. Tem duração potencialmente ilimitada em uma intensidade mais baixa.
7. A fadiga do sistema está associada com a depleção de combustível (glicogênio muscular).
8. É o sistema energético predominante em eventos de resistência, tais como as maratonas.

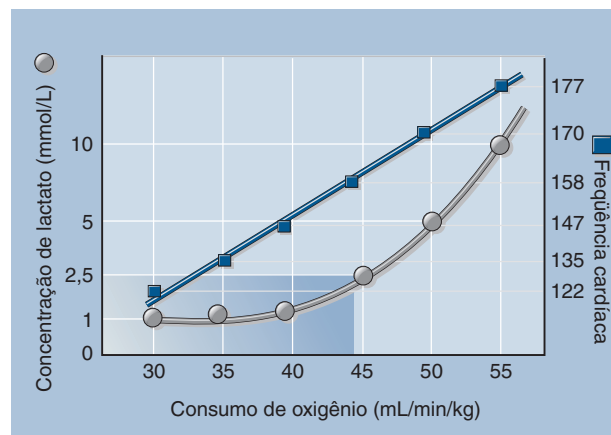


FIGURA 1.13 Limiar de lactato, que representa o ponto em que o lactato sanguíneo começa a aumentar de modo não-linear, em uma intensidade de exercício específica (18). À medida que a intensidade aumenta, os níveis sanguíneos de ácido láctico começam a acumular-se de forma exponencial.

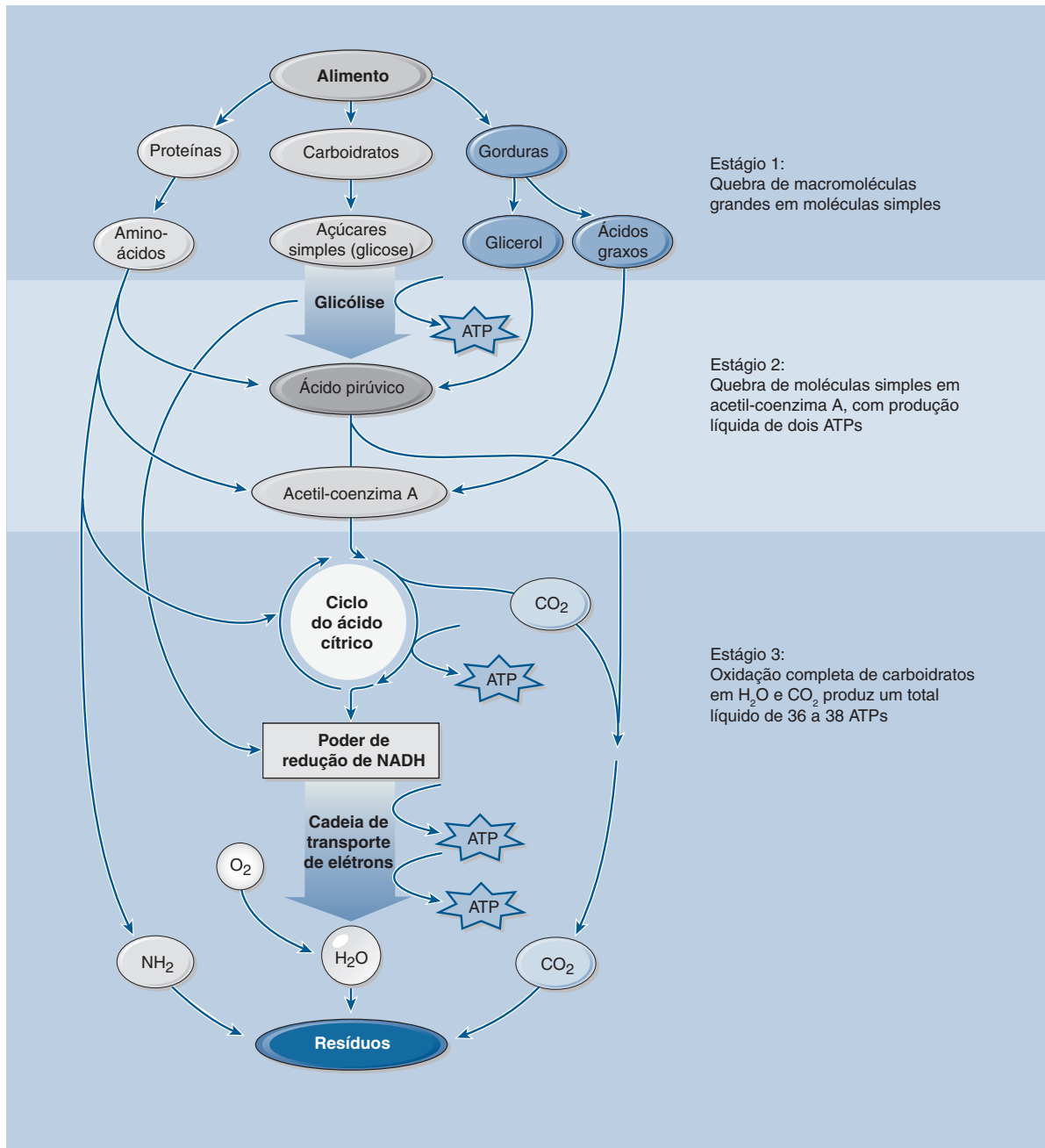


FIGURA 1.14 Resumo dos processos catabólicos envolvidos na quebra de alimento em energia.

RESUMO DOS PROCESSOS CATABÓLICOS NA PRODUÇÃO DE ENERGIA CELULAR

A Figura 1.14 resume a quebra de alimento (processo catabólico) para a produção de energia. O alimento que ingerimos é composto de gorduras, carboidratos e proteínas. Os carboidratos são quebrados em glicose sanguínea, que

pode ser usada para energia ou estocada como glicogênio. Quando as reservas de glicogênio no fígado e nos músculos estão cheias, a glicose é armazenada como gordura. A glicose, por meio da glicólise, é convertida em ácido pirúvico e depois em ácido láctico, na ausência de oxigênio (glicólise rápida), ou em acetil-CoA, se há oxigênio na célula. O acetil-CoA entra, então, no ciclo de Krebs e no sistema de transporte de elétrons para produzir ATP, com os conseqüentes produtos finais de CO₂ e H₂O.



Pergunta e resposta da área

Os carboidratos que ingerimos são sempre armazenados como carboidrato no corpo?

A quantidade de glicose que pode estar contida no sangue e a quantidade de glicogênio que pode ser armazenada no fígado e nos músculos são limitadas. Quando a quantidade de carboidrato contida no sangue como glicose e no

fígado e no músculo como glicogênio é máxima, o excesso de calorias consumido pode ser convertido em gordura. Você não precisa comer gordura para armazenar gordura corporal.

Tanto as gorduras quanto as proteínas podem ser utilizadas para energia. As gorduras são catabolizadas em glicerol e ácidos graxos. O glicerol pode ser convertido em piruvato e entrar na glicólise. Os ácidos graxos sofrem betaoxidação, são convertidos em acetil-CoA e entram no sistema de Krebs.

As proteínas são catabolizadas em aminoácidos. Os aminoácidos são desaminados, e o grupamento amina é secretado como uréia. O composto de carbono resultante pode ser convertido em piruvato, acetil-CoA ou outros intermediários do ciclo de Krebs.

EFICIÊNCIA DAS ROTAS DE PRODUÇÃO DE ENERGIA

A eficiência das rotas de produção de energia depende das demandas da atividade. À primeira vista, pode parecer que a rota aeróbia é a mais eficiente, já que produz muito mais moléculas de ATP do que as rotas anaeróbias. A eficiência, no entanto, pode ser calculada de diferentes maneiras. O método mais simples de examiná-la em cada sistema metabólico é relativo à tarefa em questão. Se a tarefa for um *sprint* de 100 m, o sistema oxidativo será muito ineficiente, uma vez que ele não tem o tempo requerido para produzir ATP. Da mesma forma, se a modalidade for a maratona, as rotas anaeróbias serão bem menos eficientes, já que não têm a capacidade de produzir ATP por um longo período. Tendo em vista essa lógica, os sistemas energéticos anaeróbios são os mais eficientes em produzir ATP imediatamente, e o sistema energético aeróbio é o mais eficiente para produzir ATP por um período continuado. O Quadro 1.7 oferece uma analogia para explicar melhor a eficiência desses sistemas.

FATORES LIMITANTES DO DESEMPENHO

Os fatores que limitam o desempenho do ponto de vista metabólico (Tabela 1.2) estão relacionados com a formação de subprodutos metabólicos (ácido lático e, possivelmente, amônia) ou a depleção de PCr ou de substratos (gorduras, carboidratos ou proteínas). Obviamente, o fator metabólico limitante em uma dada atividade dependerá do sistema energético envolvido, o qual é determinado basicamente pela intensidade e pela duração desta. Uma atividade de baixa intensidade, como uma corrida de longa distância, resultará fundamentalmente na depleção de glicogênio muscular e hepático.

QUADRO 1.7 EFICIÊNCIA DOS SISTEMAS ENERGÉTICOS AERÓBIO E ANAERÓBIO

A eficiência deve ser associada a uma tarefa específica. Por exemplo, um veículo movido a um sistema híbrido gás-elétrico é mais econômico ou eficiente em termos de quilômetros por litro do que um enorme caminhão 4 x 4 para uma viagem *cross country*, mas o caminhão é mais eficiente ao carregar ou puxar uma carga pesada ou subir um morro íngreme. A eficiência deve ser vista como específica da tarefa. Os sistemas energéticos anaeróbios são mais eficientes em produzir ATP rapidamente. O sistema aeróbio é muito ineficiente na produção de ATP se a demanda for imediata, mostrando-se mais eficiente em produzir ATP durante mais tempo e com uma carga de trabalho menor. O sistema anaeróbio, como o caminhão, é ineficiente para realizar um trabalho de baixa intensidade por um longo período. O sistema aeróbio, como o híbrido, é ineficiente para trabalhar em alta intensidade, como na tração de cargas pesadas ou na subida de um morro íngreme.

TABELA 1.2 Fatores metabólicos que limitam o desempenho	
Atividade	Principais fatores limitantes
Maratona	Glicogênio muscular, glicogênio hepático
De alta intensidade repetida (9 x 37 m)	ATP, glicogênio muscular, pH reduzido
De alta intensidade (400 m)	pH reduzido

Atividades de alta intensidade que não são repetidas em intervalos curtos (i.e., intercaladas por uma grande quantidade de repouso) não apresentam praticamente nenhum fator metabólico limitante. Em atividades de alta intensidade repetidas, o glicogênio muscular, o ATP/PCr e a redução do pH são todos possíveis fatores limitantes. Os íons de hidrogênio desprendidos da formação de ácido láctico têm mostrado diminuir a produção de força no músculo esquelético (13), possivelmente pela competição com os sítios de ligação na troponina.

CONSUMO DE OXIGÊNIO

Consumo de oxigênio é a capacidade do corpo de absorver e usar esse elemento para produzir energia. Pode ser estimado utilizando-se um analisador de gases, que pode medir o conteúdo de oxigênio do ar inspirado e expirado. O consumo máximo de oxigênio é considerado uma medida da **resistência cardiorrespiratória**. É também representado por $\dot{V}O_{2\text{máx}}$, que pode ser medido em mililitros/quilograma/peso corporal (mL/kg/pc) ou em litros/minuto (L/min). O $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ é medido em mL/kg/min quando dois indivíduos estão sendo comparados, pois o peso corporal influencia o consumo máximo de oxigênio. O segundo índice (L/min) é utilizado quando os dados de um indivíduo estão sendo comparados de um teste para outro. De uma perspectiva prática, um treinador desenvolve um programa de treinamento para seus atletas de *cross country* e deseja medir o impacto desse programa no $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ dos atletas. Antes de iniciar o programa de treinamento, o treinador obtém uma medida de referência do $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ e depois o programa começa. Então, o treinador realiza um segundo teste de $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ nos atletas, para determinar se ocorreram alterações significativas em seus respectivos valores.

Um acréscimo importante ao teste de $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ seria a capacidade de obter níveis de lactato sanguíneo durante o teste. O treinador faria seus atletas correrem numa esteira ergométrica em várias velocidades e obteria uma amostra de lactato sanguíneo em cada estágio do protocolo. As informações obtidas incluiriam:

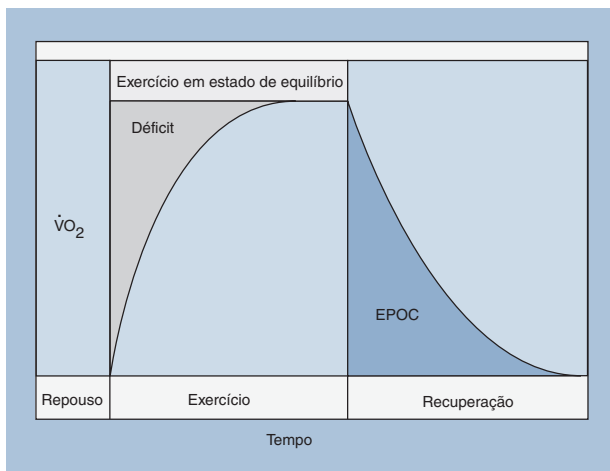
1. Em que $\dot{V}O_2$ ocorre o limiar de lactato?
2. Em que porcentagem do $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ ocorre o limiar de lactato?
3. Em que velocidade de corrida ocorre o limiar de lactato?
4. Em que frequência cardíaca (os indivíduos precisariam de um monitor de frequência cardíaca) foi alcançado o limiar de lactato?

As informações fornecidas podem ajudar o treinador e os atletas a planejarem um programa específico com base nos seus $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ que indique em que ponto e/ou porcentagem ocorreu o LL e quais frequências cardíacas (FCs) foram alcançadas no LL.

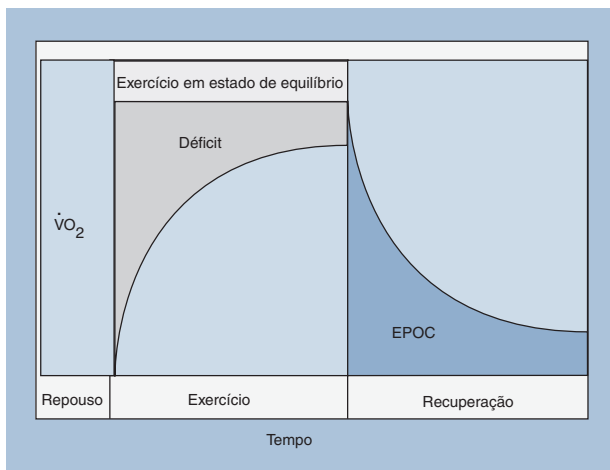
Na recuperação do trabalho anaeróbico, a energia (ATP) é suprida aerobiamente. Considerando-se que leva tempo para o sistema oxidativo começar a produzir ATP suficiente para sustentar uma atividade aeróbia, todo exercício é sustentado inicialmente pelo metabolismo anaeróbico. A porção inicial da energia suprida anaerobiamente é denominada déficit de oxigênio. Após o exercício, o “complemento” deve ser reabastecido aerobiamente. Esse reabastecimento do sistema anaeróbico é denominado débito de oxigênio, ou excesso de consumo de oxigênio pós-exercício (EPOC). O termo *EPOC* é mais preciso do que *débito de oxigênio*. O termo *débito* implica uma reposição direta do déficit ou complemento inicial. O EPOC delimita diversos processos metabólicos que entram em funcionamento pós-exercício, tais como:

1. FC elevada durante a recuperação.
2. Taxa de respiração elevada durante a recuperação.
3. Metabolismo elevado para dissipação do calor.
4. Metabolismo elevado para a quebra de hormônios liberados durante o exercício.
5. Ressíntese de reservas de ATP e CP.
6. Ressíntese de glicogênio proveniente do lactato.
7. Restauração de tecidos corporais (sangue e tecido muscular) com oxigênio (2,11,17).

O consumo de oxigênio, o déficit de oxigênio e o EPOC estão representados para o trabalho aeróbico na Figura 1.15A, e para o trabalho anaeróbico na Figura 1.15B. O exercício em que o suprimento de oxigênio é igual à demanda de oxigênio é denominado exercício em estado de equilíbrio. No exercício aeróbico, o metabolismo anaeróbico supre energia para os poucos minutos iniciais, criando um déficit de oxigênio. Embora parte desse déficit possa ser recuperada durante a atividade, deve haver a compensação após o exercício.



A



B

FIGURA 1.15 Déficit de oxigênio e EPOC (excesso de consumo de oxigênio pós-exercício). **A.** Para exercício aeróbico e **B.** para exercício anaeróbico.

Novamente, a energia para a atividade metabólica pós-exercício provém de fontes aeróbias. Com a atividade anaeróbia, observe que o déficit de oxigênio é muito maior, porque a demanda de energia é maior do que o estágio inicial de atividade aeróbia.

ESPECIFICIDADE METABÓLICA

A especificidade do treinamento é um conceito fundamental na área de treinamento e condicionamento. Se o treinamento tiver de ser específico para um esporte ou uma atividade real, então deve focar as mesmas rotas energéticas metabólicas utilizadas no esporte ou na atividade. É importante notar que todos os sistemas ener-

géticos estão, de algum modo, ativos o tempo todo. E a intensidade da atividade também é um fator determinante para a determinação de qual deles será utilizado.

O treinamento dos sistemas energéticos envolve a manipulação da intensidade e da duração da atividade. A especificidade metabólica não significa que *todo* treinamento tenha exatamente a mesma intensidade e a mesma duração que a atividade. A maioria das atividades é difícil de classificar exatamente em termos de intensidade e duração. O Quadro 1.8 fornece exemplos de especificidade de treinamento.

RESUMO

Os conceitos da bioenergética são fundamentais para entender o desempenho humano, bem como as prescrições de exercícios que vão melhorá-lo. A fonte de energia para um esporte ou uma atividade específica depende de sua intensidade e sua duração. A quebra do alimento e a sua transformação na energia de que precisamos para nos movimentar e viver constituem um processo complexo. Considerando que a adaptação humana ao treinamento é específica ao tipo deste, devemos aprender a treinar atletas de forma tal que o sistema energético apropriado seja estimulado e incrementado no momento adequado.

QUADRO 1.8 EXEMPLOS DE ESPECIFICIDADE DE TREINAMENTO

1. Se o ponto médio do tênis for 6 s e a intensidade média for 60% da máxima, isso não significa que todo o treinamento deva ser realizado por 6 s a 60% da intensidade máxima. Alguns pontos são mais curtos, e outros, mais longos. Alguns são mais intensos, e outros, menos. A duração e a intensidade, então, devem ser usadas para determinar uma faixa razoável dentro da qual a maioria do treinamento deva ficar. A progressão do treinamento geral para o treinamento metabolicamente específico também é um fator.
2. Jogadores de futebol americano realizam predominantemente explosões curtas de alta intensidade. A explosão curta de atividade requer os sistemas energéticos fosfocreatina e glicolítico anaeróbico. Planejar um programa de condicionamento que inclua atividade de *sprint*/agilidade em 5 a 10 s de exercício sustentado de alta intensidade ativaria o sistema de fosfocreatina. O sistema energético glicolítico anaeróbico seria ativado durante os *sprints* mais longos (30 s a 2 min).

QUESTÕES TÉCNICAS

1. O treinamento dos sistemas energéticos é específico para cada esporte e pode ser específico para posições dentro de um esporte. Considere um jogador de futebol americano. Cite algumas coisas que você precisaria considerar ao planejar um programa de treinamento metabolicamente específico para um jogador de futebol americano.
2. O que acontece com o excesso de carboidrato que consumimos em nossa dieta quando as reservas de glicogênio muscular estão cheias?
3. Qual o destino do ácido lático que produzimos durante o exercício?

REFERÊNCIAS

1. Bassett DR Jr, Howley ET. Limiting factors for maximum oxygen uptake and determinants of endurance performance. *Med Sci Sports Exerc* 2000;32(1):70–84.
2. Borsheim E, Bahr R. The effect of exercise intensity, duration, and mode on excess post oxygen consumption. *Sports Med* 2003;33(14):1037–1060.
3. Brooks GA. Amino acid and protein metabolism during exercise and recovery. *Med Sci Sports Exerc* 1987(5 Suppl);19:S150–S156.
4. Brooks GA. Intra- and extracellular lactate shuttles. *Med Sci Sports Exerc* 2000;32(4):790–799.
5. Brooks GA. Lactate shuttles in nature. *Biochem Soc Trans* 2002;30(2):258–264.
6. Brooks GA. The lactate shuttle during exercise and recovery. *Med Sci Sports Exerc* 1986;18(3):360–368.
7. Brooks GA, Fahey TD, Baldwin K. *Exercise Physiology: Human Bioenergetics and Its Applications*. New York: McGraw-Hill, 2005.
8. Costill D, Thompson H, Roberts E. Fractional utilization of the aerobic capacity during distance running. *Med Sci Sports* 1973;5(4):248–252.
9. Farrell P, Wilmore J, Coyle EF, et al. Plasma lactate accumulation and distance running performance. *Med Sci Sports* 1979;11(4):338–344.
10. Foster C. Blood lactate and respiratory measurement of the capacity for sustained exercise. In: Maud P, Foster D, eds. *Physiological Assessment of Human Fitness*. Champaign, IL: Human Kinetics, 1995.
11. Gaesser GA, Brooks GA. Metabolic bases of excess post oxygen consumption. *Med Sci Sports Exerc* 1984;10(1):29–43.
12. Harris RC, Edwards RHT, Hultman E, et al. The time course of phosphocreatine resynthesis during recovery of the quadriceps muscle in man. *Pfluegers Arch* 1976;97: 92–397.
13. Hermansen L. Effect of metabolic changes on force generation in skeletal muscle during maximal exercise. In: Porter R, Whelan J, eds. *Human Muscle Fatigue*. London: Pitman Medical, 1981.
14. Lafontaine T, Londeree B, Spath W. The maximal steady state versus selected running events. *Med Sci Sports Exerc* 1981;13:190–192.
15. Lawler J, Powers S, Dodd S. A time saving incremental cycle ergometer protocol to determine peak oxygen consumption. *Br J Sports Med* 1987;21(4):171–173.
16. Lehmann M, Burg A, Kapp R, et al. Correlations between laboratory testing and distance running performance in marathoners of similar ability. *Int J Sports Med* 1983;4(4): 226–230.
17. Mole P. Exercise metabolism. In: *Exercise Medicine: Physiological Principles and Clinical Application*. New York: Academic Press, 1983.
18. Smith SA, Montain SJ, Matott RP, et al. Creatine supplementation and age influence muscle metabolism during exercise. *J Appl Physiol* 1998;85(4):1349–1356.
19. Spriet LL, Howlett RA, Heigenhauser GJF. An enzymatic approach to lactate production in human skeletal muscle during exercise. *Med Sci Sports Exerc* 2000;32(4): 756–763.