

combustível” diminui e o movimento de alta intensidade cessa. Como veremos a seguir, os nutrientes representados por carboidratos, gorduras e proteínas dentro dos líquidos celulares e dos depósitos teciduais estão prontos para recarregar continuamente o reservatório de fosfatos de alta energia necessários para prosseguir com o exercício.

### Ressonância Magnética Nuclear com Espectroscopia para Estudar o Metabolismo Muscular do Exercício

A ressonância magnética nuclear (RMN) com espectroscopia proporciona um meio não-invasivo para estudar o metabolismo intracelular. A RMN aplica energia de radiofrequência para investigar e identificar o conteúdo de elementos químicos e compostos dentro do tecido vivo. A técnica proporciona a oportunidade para monitorar continuamente as concentrações relativas e os ritmos de renovação (*turnover*) dos compostos de alta energia fosforilados e de outros eventos metabólicos dentro do músculo durante o exercício.<sup>11,54,55</sup> As mensurações são feitas a intervalos regulares sem as conseqüências negativas da técnica de biópsia muscular. A Fig. 7.1A ilustra o método da RMN durante o exercício de flexão do punho. Os músculos ativos são colocados sobre um magneto supercondutor enquanto o indivíduo se exercita sob condições que permitem controlar o rendimento de potência, a velocidade de contração e a duração do exercício. A aplicação de pulsos específicos de radiofrequência dentro de um poderoso campo magnético permite determinar as concentrações de diversos compostos bioativos. A Fig. 7.1B mostra os resultados para ATP, PCr e fosfato inorgânico durante o repouso e um exercício de intensidade baixa e moderada. As áreas debaixo dos picos correspondem às concentrações relativas dos compostos com fósforo livre, incluindo os três átomos de fósforo do ATP. Esses estudos extremamente elegantes da relação do fosfato inorgânico (ion fosfato) para PCr proporcionam discernimentos acerca do ritmo da respiração mitocondrial. Com essa metodologia, os pesquisadores estudaram as lesões musculares, o metabolismo glicolítico e os efeitos do treinamento sobre as complexidades do metabolismo muscular, incluindo as relações entre o catabolismo do substrato muscular local, a capacidade funcional cardiovascular e o desempenho nos exercícios.<sup>12,50</sup>

### ENERGIA A CURTO PRAZO: SISTEMA DO ÁCIDO LÁTICO

A ressíntese dos fosfatos de alta energia terá que prosseguir com um ritmo rápido para que o exercício extenuante possa continuar. A energia para fosforilar o ADP durante o exercício intenso deriva principalmente do glicogênio muscular armazenado através da glicólise anaeróbica (ritmo máximo de transferência de energia igual a 45% daquele dos fosfatos de alta energia), com a subsequente formação de lactato. De certa forma, a glicólise anaeróbica com formação de lactato poupa tempo. Torna possível a formação rápida de ATP pela fosforilação ao nível do substrato, mesmo quando o fornecimento de oxigênio continua sendo insuficiente e/ou quando as demandas energéticas ultrapassam a capacidade do músculo para a ressíntese aeróbica do ATP. A energia anaeróbica para a ressíntese do ATP na glicólise pode ser encarada como um combustível de reserva ativado quando uma pessoa acelera durante as últimas centenas de jardas em uma corrida de 1 milha ou quando realiza

um esforço máximo durante uma corrida de 440 jardas ou uma natação de 100 jardas. Os acúmulos rápidos e significativos de lactato sanguíneo ocorrem durante o exercício máximo que dura entre 60 e 180 segundos. Uma redução na intensidade desse exercício árduo para prolongar o período do exercício acarreta uma redução correspondente tanto no ritmo de acúmulo quanto no nível final de lactato sanguíneo.<sup>46</sup>

45-180 seg.

### Acúmulo de Lactato

O lactato sanguíneo não se acumula para todos os níveis de exercício. A Fig. 7.2 ilustra a relação geral entre consumo de oxigênio, enunciado como um percentual do máximo, e o lactato sanguíneo durante um exercício leve, moderado e intenso realizado por atletas de endurance e por indivíduos destreinados. As reações que consomem oxigênio atendem adequadamente às demandas de energia dos indivíduos treinados e destreinados durante um exercício relativamente leve (< 50% da capacidade aeróbica). Em termos bioquímicos, a energia gerada pela oxidação do hidrogênio proporciona o ATP predominante para a atividade muscular. Qualquer lactato formado em uma parte de um músculo ativo acaba sendo oxidado rapidamente pelas fibras musculares com uma alta capacidade oxidativa (coração e outras fibras do mesmo músculo ou dos músculos vizinhos menos ativos).<sup>14,45,47</sup> Quando a oxidação do lactato iguala sua produção, o nível sanguíneo de lactato se mantém estável apesar de um aumento na intensidade do exercício e no consumo de oxigênio.

Para as pessoas sadias porém destreinadas, o lactato sanguíneo começa a acumular-se e sobe de maneira exponencial para aproximadamente 55% de sua capacidade máxima para o metabolismo aeróbico.<sup>21</sup> A explicação habitual para um acúmulo do lactato sanguíneo durante o exercício pressupõe uma hipoxia tecidual relativa. Quando o metabolismo glicolítico predomina,

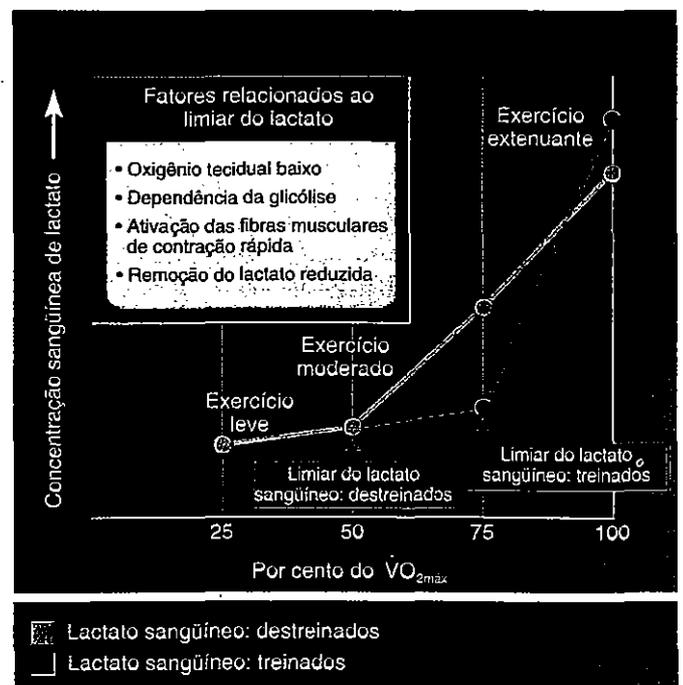


FIG. 7.2 • Concentração sanguínea de lactato para indivíduos treinados e destreinados com diferentes níveis de exercício enunciada como percentual do consumo máximo de oxigênio (VO<sub>2</sub> máx).

a produção de nicotinamida adenina dinucleotídeo (NADH) ultrapassa a capacidade da célula de arremessar seus hidrogênios (elétrons) através da cadeia respiratória, pois existe uma quantidade insuficiente de oxigênio ao nível tecidual. O desequilíbrio na liberação de oxigênio e a subsequente oxidação (mais precisamente, a relação  $NAD^+/NADH$  citoplasmática) fazem com que o piruvato possa aceitar o excesso de hidrogênios, o que resulta em acúmulo de lactato.<sup>49</sup>

A pesquisa que utiliza rastreadores radioativos para marcar o carbono na molécula de glicose proporciona uma explicação alternativa para o acúmulo de lactato no músculo e seu subsequente aparecimento no sangue.<sup>13,23</sup> Esses estudos mostram que o lactato é formado continuamente durante o repouso e o exercício moderado. Em condições aeróbicas, o ritmo de remoção do lactato por outros tecidos corresponde a seu ritmo de formação, resultando em ausência de qualquer acúmulo efetivo de lactato (isto é, a concentração sanguínea de lactato se mantém estável). Somente quando a remoção não mantém paralelismo com a produção o lactato acumula-se no sangue. As adaptações dentro do músculo induzidas pelo treinamento aeróbico permitem os altos ritmos de renovação do lactato; assim sendo, o lactato acumula-se para os níveis mais altos de exercício que no estado destreinado.<sup>63</sup> Outra explicação para o acúmulo de lactato durante o exercício poderia incluir a tendência para a enzima desidrogenase láctica (LDH) nas fibras musculares de contração rápida em favorecer a conversão do piruvato para lactato. Por outro lado, o nível de LDH nas fibras musculares de contração lenta favorece a conversão de lactato para piruvato. Portanto, o recrutamento das fibras de contração rápida com o aumento da intensidade do exercício favorece a formação de lactato, independentemente da oxigenação tecidual.

A produção e o acúmulo de lactato são acelerados quando o exercício torna-se mais intenso e as células musculares não conseguem atender às demandas energéticas adicionais aerobicamente nem oxidar o lactato com o mesmo ritmo de sua produção. Existe um padrão semelhante para os indivíduos destreinados e os atletas de endurance, exceto que o limiar para o acúmulo de lactato, denominado limiar de lactato no sangue, ocorre com um percentual mais alto da capacidade aeróbica do atleta.<sup>20,28,67,69,70</sup> Os atletas treinados em endurance, por exemplo, realizam um exercício aeróbico em ritmo estável com intensidades entre 80 e 90% de sua capacidade máxima para o metabolismo aeróbico.<sup>66</sup> Esta resposta aeróbica favorável pode ser explicada pelo dote genético específico dos atletas (p. ex., tipos de fibras musculares, responsividade do fluxo sanguíneo muscular), pelas adaptações locais específicas ao treinamento que favorecem uma menor produção de lactato,<sup>17,18,27,41</sup> ou por um ritmo mais rápido de remoção do lactato (depuração ou renovação do lactato) para qualquer intensidade do exercício.<sup>14,52</sup> Por exemplo, a densidade capilar e o tamanho e o número das mitocôndrias aumentam com o treinamento de endurance, o mesmo ocorrendo com a concentração das enzimas e os agentes de transferência no metabolismo aeróbico.<sup>30,41,64</sup> Essa resposta ao treinamento não costuma ser deteriorada pelo envelhecimento.<sup>19</sup> Essas ajustagens e adaptações ao treinamento aprimoram com certeza a capacidade da célula de gerar ATP aerobicamente através do catabolismo da glicose e dos ácidos graxos. A manutenção de um baixo nível de lactato conserva também as reservas de glicogênio, o que permite prolongar a duração de um esforço aeróbico de alta intensidade. O Cap. 14 aborda em maior profundidade o conceito do limiar de lactato no sangue, sua mensuração e sua relação com o desempenho de endurance e, no Cap. 2, foram abordadas as adaptações que ocorrem com o treinamento.

## Capacidade Produtora de Lactato

A capacidade de gerar altos níveis sanguíneos de lactato durante o exercício máximo aumenta com o treinamento anaeróbico específico de velocidade-potência e, subsequentemente, diminui com o destreinamento. Os atletas de velocidade-potência em geral alcançam níveis sanguíneos de lactato 20 a 30% mais altos que seus congêneres destreinados durante o exercício máximo de curta duração. O mecanismo para essa resposta resulta provavelmente de um ou mais dos seguintes fatores: (1) maior motivação que acompanha o estado treinado, (2) maiores reservas intramusculares de glicogênio que acompanham o treinamento, o que permite provavelmente uma maior contribuição da energia através da glicólise anaeróbica e (3) um aumento de aproximadamente 20% induzido pelo treinamento nas enzimas que regulam a glicólise, particularmente fosfofrutocinase. Entretanto, seus aumentos são bem inferiores ao aumento de duas a três vezes nas enzimas aeróbicas observado com o treinamento de endurance.<sup>41,45</sup> Levando-se em conta que os tecidos metabolizam continuamente o lactato durante o exercício e a recuperação, o acúmulo de lactato sanguíneo medido em um determinado momento durante a recuperação não explica plenamente a capacidade do indivíduo em termos de metabolismo anaeróbico conforme refletido pelo acúmulo de lactato.<sup>28</sup>

## ENERGIA A LONGO PRAZO: SISTEMA AERÓBICO

As reações da glicólise formam relativamente pouco ATP. Conseqüentemente, o metabolismo aeróbico proporciona a maior parte da transferência de energia quando o exercício intenso dura por mais de alguns minutos.

## Consumo de Oxigênio Durante o Exercício

A Fig. 7.3 ilustra o consumo de oxigênio — também denominada captação de oxigênio pulmonar, pois as mensurações do oxigênio são feitas ao nível do pulmão e não dos músculos ativos — durante cada minuto de uma corrida uniforme, relativamente lenta, com duração de 10 minutos. O consumo de oxigênio aumenta exponencialmente durante os primeiros minutos do exercício (componente rápido do consumo de oxigênio do exercício) para alcançar um platô entre o terceiro e o quarto minutos.<sup>10</sup> A seguir permanece relativamente estável durante toda a duração do exercício. Os termos estado estável e ritmo estável em geral descrevem a porção plana (platô) da curva do consumo de oxigênio. Ritmo estável reflete um equilíbrio entre a energia de que os músculos ativos necessitam e a produção de ATP no metabolismo aeróbico. Dentro dessa região, as reações que consomem oxigênio fornecem a energia para o exercício; todo o lactato produzido será oxidado ou transformado em glicose pelo ciclo de Cori no fígado e, possivelmente, nos rins. O lactato sanguíneo não se acumula sob condições metabólicas de ritmo estável.

Teoricamente, depois que a pessoa alcança um ritmo estável de metabolismo aeróbico, o exercício poderia progredir indefinidamente se o indivíduo tivesse a vontade de fazê-lo. É evidente que isso pressupõe que o metabolismo aeróbico em ritmo estável seria o único determinante da capacidade de realizar um exercício submáximo. Com demasiada frequência, a perda de líquidos e a depleção eletrolítica representam fatores limitantes significativos, especialmente durante o exercício em um clima quente. Além disso, a manutenção de reservas adequadas tanto de glicogênio hepático para o funcionamento do sistema nervoso