

ASPECTOS METABÓLICOS DO EXERCÍCIO INTERMITENTE

METABOLIC ASPECTS OF THE INTERMITTENT EXERCISE

Paulo Henrique Marchetti¹ e Fernando de Campos Mello¹

¹ Universidade de São Paulo.

RESUMO

O exercício intermitente de alta intensidade e curta duração, separado por diferentes períodos de recuperação, tem sido amplamente utilizado durante o treinamento de diferentes esportes. Entretanto, a contribuição energética de cada estímulo e sua relação com os diferentes intervalos de recuperação são parâmetros necessários para a correta prescrição do treinamento. O exercício intermitente de alta intensidade é caracterizado pela execução de vários estímulos máximos, com um pequeno intervalo de tempo de recuperação entre eles. Ao longo desses exercícios, ocorrem alterações no desempenho e na contribuição dos sistemas metabólicos. As proporções dessas alterações estão diretamente ligadas à relação do tempo de esforço e recuperação.

Palavras-chave: fisiologia, intermitente, metabolismo.

ABSTRACT

The Intermittent maximal exercise has been widely used in sports. However, the energetic contribution to each stimulus and the different intervals of recovery are essential to understand the prescription of exercises. The intermittent maximal exercise is characterized by stimuli and short period of recovery between them. Along these stimuli several changes occur on the performance and on the energetic contribution of the metabolic systems. These changes are directly related to time of effort and recovery.

Keywords: physiology, intermittent, metabolism.

INTRODUÇÃO

O exercício intermitente de alta intensidade e curta duração, separado por diferentes períodos de recuperação, tem sido amplamente utilizado durante o treinamento de diferentes esportes. Entretanto, a contribuição energética de cada estímulo e sua relação com os diferentes intervalos de recuperação são parâmetros necessários para a correta prescrição do treinamento. Desta forma, investigar tais parâmetros metabólicos pode auxiliar na compreensão fisiológica da predominância de cada sistema energético e suas mudanças ao longo dos estímulos.

Portanto, tem-se como objetivo revisar as alterações metabólicas que ocorrem em atividades intermitentes de alta intensidade. Para tal, optou-se por dividir esta revisão em fisiologia do estímulo único e de diversos estímulos.

REVISÃO DE LITERATURA

Fisiologia do estímulo máximo único

Para o entendimento das alterações fisiológicas no exercício máximo, foram verificadas as alterações ocorridas durante e após um único estímulo. O músculo esquelético pode realizar trabalho na ausência de um fornecimento adequado de oxigênio. Para tal, o músculo utiliza os sistemas de ressíntese anaeróbios (fosfagênicos e glicolítico) (MAUGHAN & GLEESON, 2007; MAUGHAN, GLEESON & GREENHAFF, 2000).

Sistema Fosfagênio

A fonte inicial de energia muscular é o ATP estocado; além deste, os estoques de creatinafosfato (CP) intramuscular formam o sistema fosfagênio. A propriedade mais importante dos fosfagênios é que o estoque de energia que eles representam torna-se disponível para o músculo quase que de modo imediato. Durante 10s de exercício máximo, a concentração de ATP nas fibras do tipo I não se altera; entretanto, a concentração cai aproximadamente 40% nas fibras tipo IIa e 70%, nas tipo IIb (MAUGHAN & GLEESON, 2007; MAUGHAN, GLEESON & GREENHAFF, 2000). No caso de a atividade ser mantida por mais de 15s, a concentração de ATP nas fibras tipo II cai um pouco mais, associada à queda significativa na concentração de ATP nas fibras tipo I.

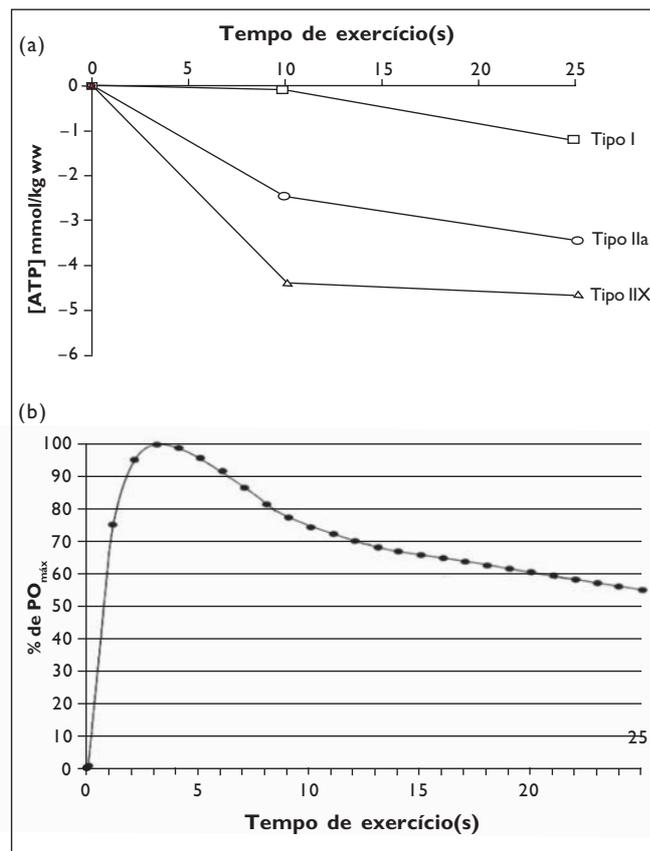


Figura 1: Gráfico representativo (a) do declínio da concentração de ATP nas diferentes tipos de fibra muscular do vasto lateral, durante 10 e 25s de ciclismo isocinético máximo; (b) produção de potência durante 25s de ciclismo isocinético máximo (adaptado de MAUGHAN & GLEESON, 2007).

A potência mais elevada no exercício máximo é alcançada dentro de 2-3s, sendo que, após 10s, ocorre uma queda de 20-25% na produção de potência. Isto sugere que as fibras tipo II contribuem para a produção de potência mecânica após os primeiros 10s de uma atividade máxima (Figura 1) (MAUGHAN & GLEESON, 2007; MAUGHAN, GLEESON & GREENHAFF, 2000).

Fosfocreatina (PC)

A PC é restrita ao citoplasma da célula muscular, com uma concentração de, aproximadamente, 20mmol/kgww (mmol/kg massa seca [dm]), sendo três a quatro vezes maior do que a concentração intramuscular de ATP. A PC no músculo pode ser utilizada para ressintetizar ATP numa taxa alta. Esta taxa de transferência de energia corresponde à capacidade de

gerar um rendimento de alta potência. A degradação rápida de PC, no início de uma atividade de alta intensidade, ocorre, pois tem uma maior transferência de grupamento fosfato do que o ATP, resultando em maior quantidade de energia livre da hidrólise do PC, comparado ao ATP. Isto resulta em uma maior probabilidade de transferência de energia livre de PC para ADP, transformando-o novamente em ATP. A velocidade na qual as reações ocorrem é maior do que qualquer uma das reações que utilizam ATP celular.

Maughan & Gleeson (2007) descreveram três possíveis funções do PC dentro do músculo esquelético: (a) atuar como tampão temporário para manter a concentração celular de ATP e a relação ATP/ADP; (b) agir como tampão energético espacial, sendo um sistema de transporte energético entre o local de produção de ATP (mitocôndrias) e os locais de utilização (miofibrilas); (c) promover acoplamento funcional com várias outras reações celulares, facilitando a integração do metabolismo energético durante a contração muscular.

A principal desvantagem deste sistema é a sua capacidade limitada, em função de sua disponibilidade energética. Os estoques de CP muscular podem ser quase completamente depletados em um exercício

máximo. Como por exemplo, durante uma corrida máxima de 30-50m, nenhuma desaceleração ocorre nos últimos metros, visto que as necessidades energéticas são amplamente abastecidas pela degradação dos estoques de fosfagênios. Naturalmente, em distâncias maiores, a velocidade da corrida começa a diminuir em função de as concentrações de PC declinarem e, conseqüentemente, a produção de potência (MAUGHAN & GLEESON, 2007; MAUGHAN, GLEESON & GREENHAFF, 2000). Entretanto, em aproximadamente dois a três minutos de recuperação, uma segunda atividade explosiva já pode ser realizada. Para atividades maiores (ex.: 100m ou mais), são necessários maiores períodos de recuperação (MAUGHAN & GLEESON, 2007; MAUGHAN, GLEESON & GREENHAFF, 2000). Isto ocorre, pois, na recuperação do exercício, quando o ATP é regenerado a partir da fosforilação oxidativa, a creatina cinase pode utilizar o ATP para repor o estoque de PC (MAUGHAN & GLEESON, 2007).

A ressíntese do PC após o exercício segue uma curva exponencial (Figura 2), e sua meia-vida de ressíntese (estocar 50% dos valores de repouso) é definida em, aproximadamente, 30s. Entretanto, es-

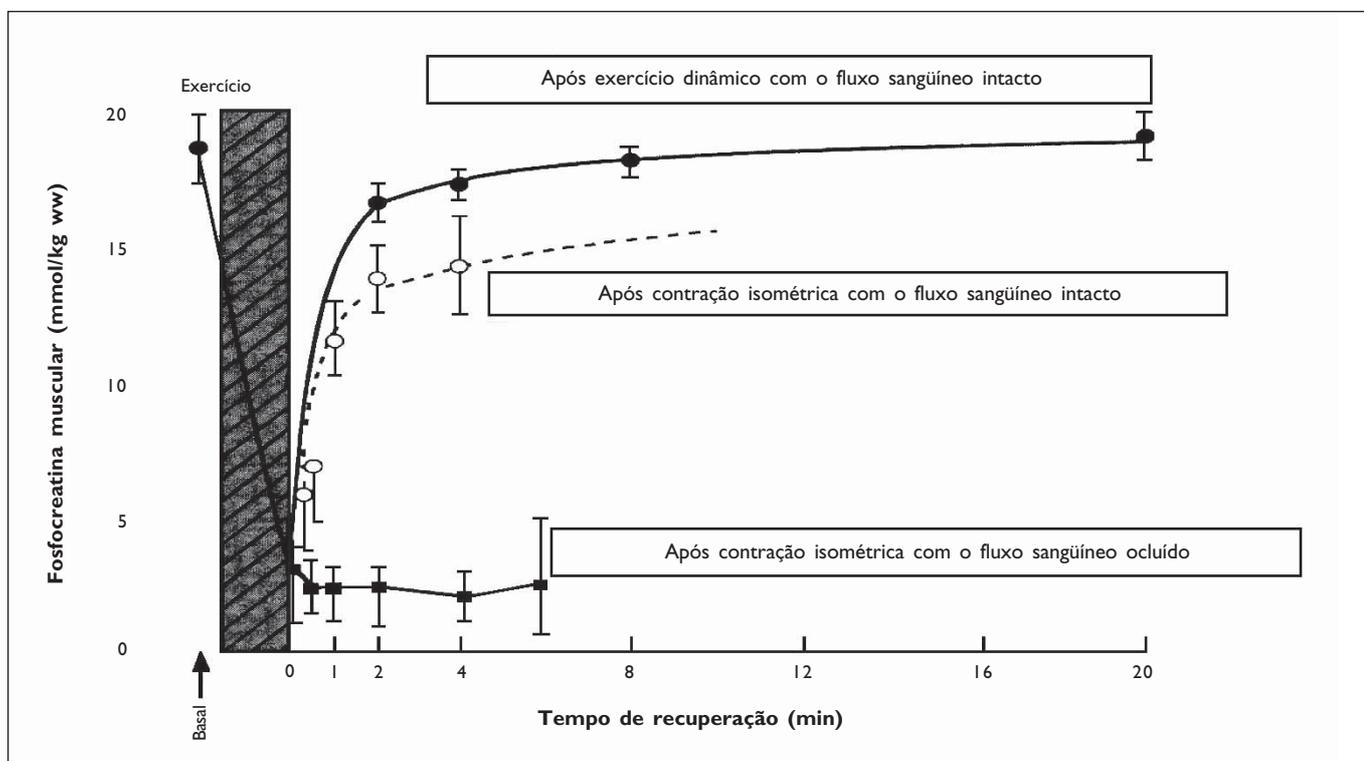


Figura 2: Gráfico representativo do tempo necessário para a ressíntese de PC após exercício máximo (adaptado de MAUGHAN & GLEESON, 2007).

tes valores dependem do tipo de exercício, da duração e do número completado de sessões do exercício (MAUGHAN & GLEESON, 2007).

Maughan & Gleeson (2007) citaram possíveis fatores influenciadores na taxa de ressíntese de PC durante a recuperação do exercício: (a) concentrações celulares de ATP, ADP e Cr; (b) o H⁺, conhecido como potente inibidor da creatina cinase; (c) baixo pH muscular, baixa tensão de oxigênio e/ou redução intensa do fluxo sanguíneo-muscular.

A taxa de ressíntese de PC nas diferentes tipagens de fibras musculares é diferente após sua depleção. A taxa de ressíntese de PC é significativamente mais baixa nas fibras do tipo II durante os primeiros minutos de recuperação. Mas, após os minutos iniciais, a ressíntese de PC é acelerada, de modo que, após 15 minutos de recuperação, a concentração de PC é maior que a de repouso (mecanismo desconhecido).

Glicólise e Glicogenólise

Quando o exercício máximo dura mais do que alguns segundos, observa-se um aumento marcante na contribuição da glicólise para a ressíntese do ATP. A glicogenólise é a hidrólise do glicogênio muscular em glicose 1-fosfato, e a glicólise é a série de reações envolvidas na degradação da glicose 1-fosfato em lactato. Os estimuladores da glicólise e da glicogenólise relacionam-se à ativação muscular pelo Ca²⁺ e o acúmulo de produtos da hidrólise do ATP e da CP (ADP, AMP, IMP, NH₃ e Pi), garantindo, desta forma, a manutenção da produção anaeróbia de ATP por um curto espaço de tempo (M). A glicólise anaeróbia envolve muito mais etapas do que a hidrólise de PC e pode fornecer ATP em uma taxa mais baixa.

Metabolismo associado ao exercício intermitente de alta intensidade

Durante o exercício intermitente de alta intensidade, observa-se a utilização primária dos sistemas anaeróbios de ressíntese de ATP, com diferentes percentuais de participação em função do tempo. A Figura 3 apresenta um esquema da participação dos sistemas de ressíntese do ATP, em função da intensidade do estímulo.

Pode-se observar, na Figura 4, a utilização dos diferentes sistemas para a ressíntese do ATP muscular. Observa-se uma maior utilização do PC no início da contração (~2s), após 2,6s de contração, o ATP origi-

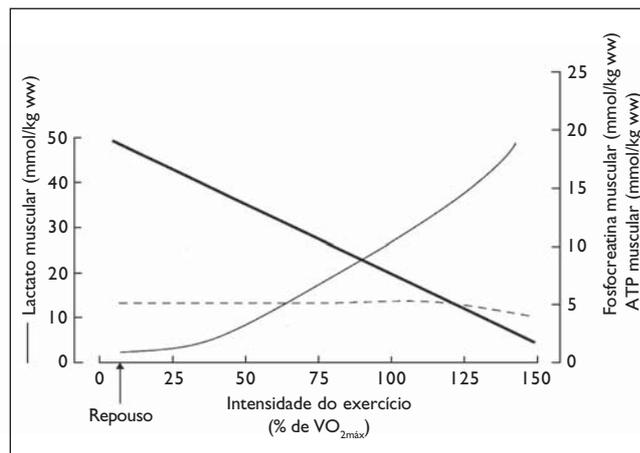


Figura 3: Gráfico representativo da participação dos sistemas metabólicos de ressíntese do ATP em função da intensidade do exercício (adaptado de MAUGHAN & GLEESON, 2007).

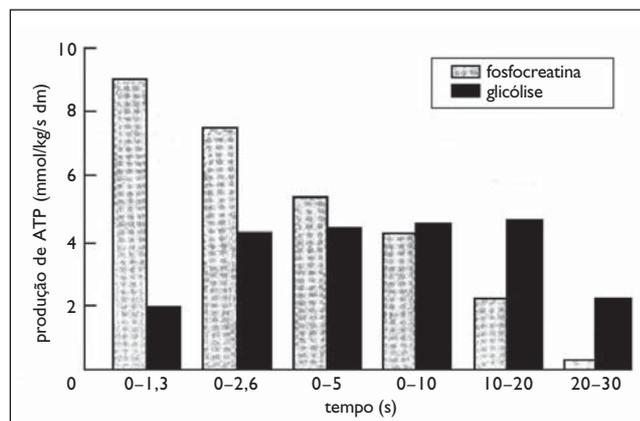


Figura 4: Gráfico representativo da taxa de ressíntese de ATP a partir da CP e glicólise durante atividade isométrica (adaptado de MAUGHAN & GLEESON, 2007).

nado do PC é reduzido em ~15% e, após 10s de contração, está em torno de 50%. A participação do PC nos últimos 10s é pequena e está em torno de 2% da produção inicial. A queda na taxa de degradação do PC declina, a potência e a força declinam, em função da diminuição da ressíntese de ATP, fator este determinado pela alta velocidade na ressíntese de ATP pela via fosfagênica, em comparação à glicólise e à glicogenólise (MAUGHAN & GLEESON, 2007).

A ressíntese do ATP, a partir da glicólise, para uma atividade máxima de 30s, começa quase imediatamente ao início do exercício. A produção máxima de ATP não alcança sua taxa máxima até após 5s do exercício, sendo mantida por vários segundos.

Os estoques de glicogênio muscular são degradados rapidamente com uma alta taxa, diretamente re-

lacionada à formação do lactato. Grande proporção dos estoques de glicogênio muscular pode ser utilizada para a transferência anaeróbia de energia e fornece parte principal da exigência energética para esforços de alta intensidade que durem de 20s a 2 min.

Em repouso, as concentrações de glicogênio e PC são maiores nas fibras musculares do tipo II do que nas do tipo I, como mostra a Tabela abaixo.

A Figura 5 mostra as taxas de degradação do glicogênio e PC em condições experimentais. Durante contrações intensas, as taxas de glicogenólise e de degradação de PC são maiores nas fibras do tipo II do que nas do tipo I. A taxa de degradação nas fibras do tipo II é quase máxima e semelhante àquela observada durante a contração com oclusão circulatória.

Metabolismo e diferentes tempos de estímulo de alta intensidade

Diversos estudos buscam relacionar o tempo de estímulo máximo com alteração na potência e a utilização das vias metabólicas predominantes para a ressíntese do ATP.

Os estudos de Spriet *et al.* (1989) (oito sujeitos treinados) e Trump *et al.* (1996) (sete sujeitos treinados) mostram queda na potência no primeiro estímulo, utilizando estímulos máximos de 30s com intervalos de 4min em um cicloergômetro isocinético (100rpm).

McCartney *et al.* (1986) investigaram oito sujeitos do sexo masculino que realizaram quatro condutas de 30s em um cicloergômetro isocinético a 100rpm, com intervalos de 4min. Neste estudo, foram analisadas a potência muscular e as alterações metabólicas musculares. O mais alto pico de potência e a potência média para uma revolução no pedal foi encontrada

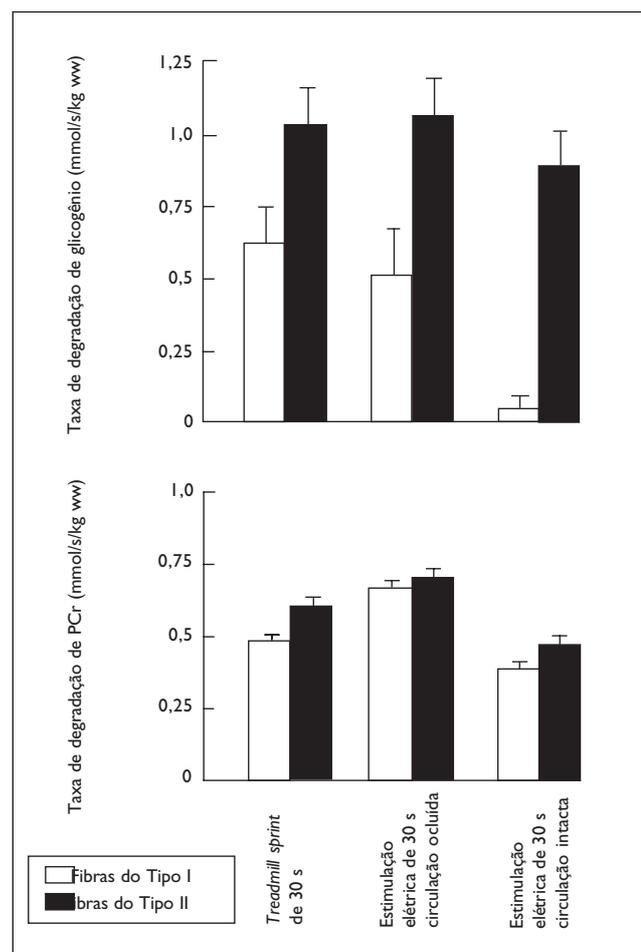


Figura 5: Gráfico representativo da degradação metabólica nas diferentes fibras musculares (tipo I e II) (adaptado de MAUGHAN & GLEESON, 2007).

nos primeiros segundos da primeira conduta. A potência máxima foi alcançada dentro dos dois primeiros segundos do exercício. Tal geração de potência máxima, por períodos curtos de atividade máxima, ativa simultaneamente as vias de quebra de CP e

Tabela I: Conteúdo de glicogênio, ATP e PC nas diferentes fibras musculares (adaptado de SPRIET, 1995)

Reference	Glicogênio		PCr		ATP	
	I	II	I	II	I	II
Tesch <i>et al.</i> (97)	-	-	73.1 ± 9.5	82.7 ± 11.2*	-	-
Soderlund & Hultman (89)	-	-	-	-	25.2 ± 4.0	25.9 ± 3.6
Soderlund & Hultman (90)	-	-	72.3 ± 4.5	83.3 ± 9.8*	23.9 ± 1.4	25.0 ± 1.2
Soderlund <i>et al.</i> (91)	399 ± 47	480 ± 33*	79.4 ± 2.4	89.6 ± 5.2*	23.7 ± 0.6	25.2 ± 0.6*
Greenhaff <i>et al.</i> (33)	399 ± 47	445 ± 47*	67.7	71.2	24.1	25.5
Greenhaff <i>et al.</i> (35)	364 ± 23	480 ± 24*	85.4 ± 2.8	88.5 ± 4.9	25.5 ± 0.5	25.7 ± 0.5

Data are means ± SE. Numbers in parentheses are references. Fiber types are designated type I or slow twitch and type II or fast twitch. Units for glycogen, phosphocreatine (PCr), and ATP are mmol/kg dry muscle.

*; significantly different from type I fibers.

glicogênio. As concentrações de ATP muscular diminuíram em 40% após o primeiro exercício, assim como a concentração de CP, que teve queda de 70%. Entretanto, foi demonstrado que as concentrações de ATP e CP eram recuperadas em 95 e 76% das de repouso no primeiro período de recuperação. A concentração de lactato plasmático aumentou de $1,43 \pm 0,25$ mmol/L para $6,8 \pm 1,1$ mmol/L após o primeiro período de exercício, atingindo $28,9 \pm 2,7$ mmol/L ao término do primeiro período de recuperação. Durante o primeiro intervalo, o lactato plasmático teve o maior incremento dentre as subseqüentes condutas. A queda na concentração de glicose muscular foi acompanhada pelo aumento da concentração de lactato sanguíneo e muscular. Para o glicerol plasmático, houve também um aumento após o primeiro exercício. A extensão na qual a glicogenólise foi ativada foi indicada pelo aumento nas concentrações das enzimas da via glicolítica, como G-6-P e F-6-P, que aumentaram em dez vezes, sendo que a F-1,6-Bp (indicador de inibição da PFK) aumentou em cinco vezes. Isto representa uma grande participação do sistema glicolítico já na primeira ação máxima.

Smith & Hill (1993) utilizaram o teste de Wingate para verificar a contribuição dos sistemas energéticos (Figura 6). Após os testes, foi calculada a contribuição do CP, assumindo 100% da contribuição até o pico de potência atingido (2,5s), e a contribuição do ATP-CP declina linearmente durante os 10s iniciais (o cálculo foi baseado nos primeiros 5s). A contribuição aeróbia foi calculada mensurando o consumo de oxigênio em intervalos de 5s, utilizando $20,92$ kJ-l O₂, assumindo 100% de uso do carboidrato, e a eficiência de 18,5%. A contribuição glicolítica foi determinada

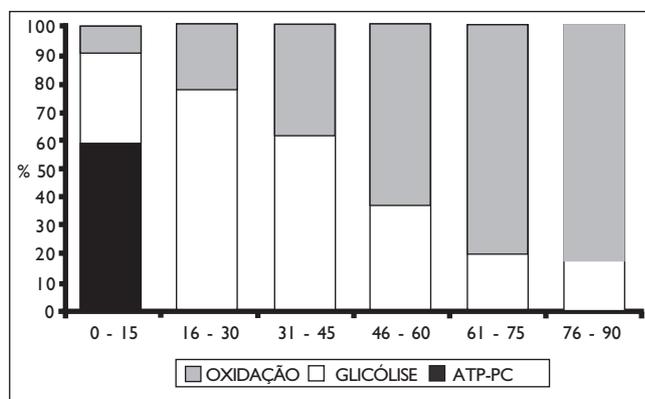


Figura 6: Gráfico representativo da contribuição dos sistemas energéticos no teste de Wingate, utilizando percentuais do trabalho total (adaptado de SMITH & HILL, 1991).

pela subtração das contribuições do ATP-CP e aeróbias do trabalho total realizado.

FISIOLOGIA DO EXERCÍCIO INTERMITENTE

O exercício intermitente de alta intensidade é caracterizado pela execução de vários estímulos máximos com um pequeno intervalo de tempo de recuperação entre eles. Ao longo desses exercícios, ocorrem alterações no desempenho e na contribuição dos sistemas metabólicos. As proporções dessas alterações estão diretamente ligadas à relação do tempo de esforço e recuperação.

Contribuição dos sistemas metabólicos

Com a seqüência de repetições dos estímulos, um efeito somatório de cargas ocorre. Como consequência disso, há uma queda progressiva dos estoques de CP, fazendo com que participação do sistema ATP/CP se torne menos efetiva ao longo dos estímulos. Fenômeno semelhante ocorre com o sistema glicolítico. Evidência disso é a queda progressiva do acúmulo de lactato, tanto sanguíneo como muscular ao longo dos estímulos (SPRIET *et al.*, 1989; MCCARTNEY, 1986). Entretanto, em exercício intermitente com dez estímulos máximos de 6s por 30s de recuperação, Gaitanos *et al.* (1993) observaram uma queda da contribuição absoluta do sistema ATP/CP, porém, quando posto em valores relativos, houve um aumento da sua participação.

Como consequência dessa queda na contribuição dos sistemas anaeróbios, a participação do sistema oxidativo aumenta para tentar suprir a demanda energética exigida na atividade. A Figura 7 ilustra a par-

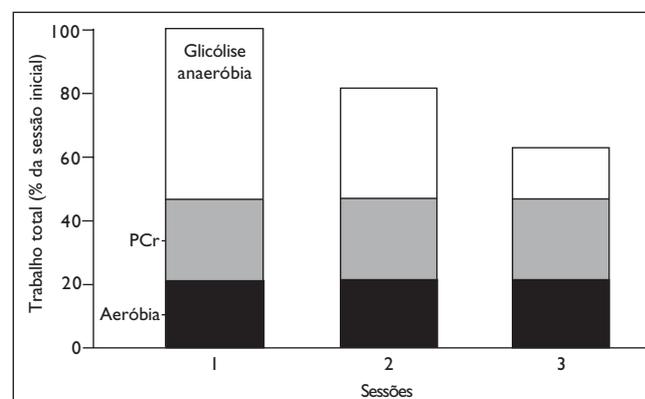


Figura 7: Participação dos sistemas metabólicos em três estímulos máximos de 30s com 4min de intervalo (adaptado de SPRIET, 1995).

ticipação dos sistemas energéticos durante um exercício intermitente com três estímulos máximos de 30s por 4min de recuperação. A figura supõe um aumento apenas relativo da contribuição aeróbia. Porém, Bogdanis *et al.* (1996) encontraram em estudo similar um aumento da contribuição do sistema oxidativo, também em valores absolutos, compensando parcialmente a redução da energia fornecida pelas vias anaeróbias.

Desempenho

O sucesso no desempenho em exercício intermitente de alta intensidade está diretamente ligado à capacidade de recuperação das vias anaeróbias. Quanto maior essa recuperação, menor será a queda da contribuição das vias anaeróbias e, conseqüentemente, melhor será o desempenho. Bogdanis *et al.* (1995) avaliaram dois estímulos máximos com diferentes intervalos de recuperação e encontraram que, com maior tempo de recuperação, a potência pico (Ppico) tinha uma recuperação maior em relação ao primeiro estímulo, já que a Ppico depende essencialmente do sistema ATP/CP, e o tempo de recuperação maior permite uma maior ressíntese de CP. Já a potência média também recupera mais com o intervalo maior, porém em menor proporção que a Ppico. Isso ocorre devido ao fato de a potência mé-

dia ser mais dependente do sistema glicolítico e o maior tempo de recuperação testado no estudo (6min) não ser o suficiente para grande alteração na participação desse sistema.

Ao longo da repetição de estímulos máximos, a potência média e o pico diminuem. Em estímulos máximos repetidos de 30s com 4min de intervalo, o desempenho tende a se estabilizar a partir do terceiro estímulo, conforme mostra a Figura a seguir.

Já em dez estímulos máximos repetidos de 6s por 30s de recuperação, o desempenho se mantém sem diferença significativa até o quarto estímulo, com progressiva queda até o último, 73% da potência média do primeiro estímulo (GAITANOS, WILLIAMS & BROOKS, 1993).

CONCLUSÃO

Como pôde ser observado com os dados apresentados, o exercício intermitente de alta intensidade tem características bem distintas das características de um único estímulo máximo, com contribuições bem diferentes das vias metabólicas. Portanto, a simples análise das características do estímulo sem levar em consideração o conjunto todo do exercício intermitente pode levar a erros significativos na prescrição e na orientação do treinamento.

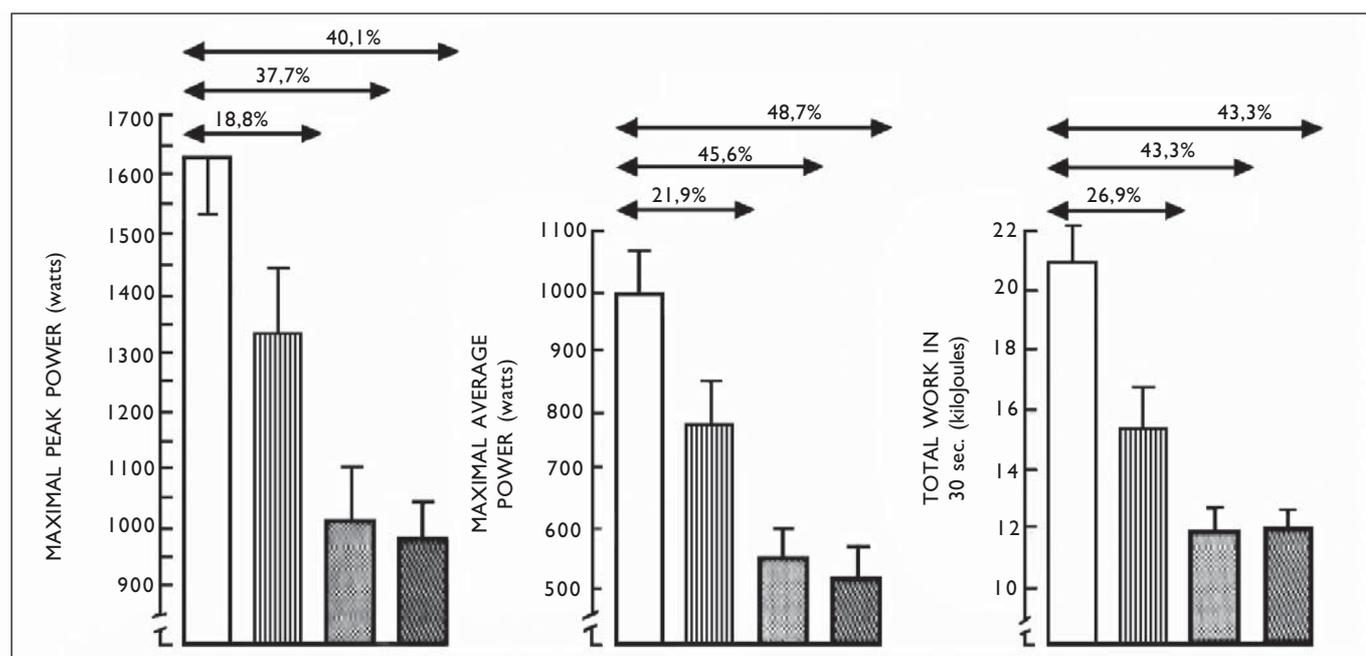


Figura 8: Potência pico, potência média e trabalho total durante quatro estímulos máximos de 30s com intervalo de 4min (adaptado de MCCARTNEY *et al.*, 1986).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOGDANIS, G.C. & NEVILL, M.E. "Contribution of phosphocreatine and aerobic metabolism to energy supply during repeated sprint exercise". *J Appl Physiol*, 1996. 80(3): p. 876-884.

_____. "Recovery of power output and muscle metabolites following 30s of maximal sprint cycling in man". *Journal of Physiology*, 1995: p. 467-480.

GAITANOS, G.C.; WILLIAMS, C. & BROOKS, S. "Human muscle metabolism during intermittent maximal exercise". *J Appl Physiol*, 1993. 75(2): p. 712-719.

MAUGHAN, R. & GLESSON, M. *As bases bioquímicas do desempenho nos esportes*. 1.ed. Rio de Janeiro: 2007. 182.

MAUGHAN, R.; GLESSON, M. & GREENHAFF, P.L. *Bioquímica do exercício e do treinamento*. 1.ed. São Paulo: 2000.

MCCARTNEY, N. et al. "Muscle power and metabolism in maximal intermittent exercise". *J Appl Physiol*, 1986. 60(4): p. 1.164-9.

TRUMP, M.E. et al. "Importance of muscle phosphocreatine during intermittent maximal cycling". *J Appl Physiol*, 1996. 80(5): p. 1.574-80.

SMITH, J.C. & HILL, D.W. "Contribution of energy systems during a Wingate power test". *Br J Sports Med*, 1991. 25(4): p. 196-9.

SPRIET, L.L. *Exercise Metabolism*. Human Kinetics. 1995.

SPRIET, L.L. et al. "Muscle glycogenolysis and H⁺ concentration during maximal intermittent cycling". *J Appl Physiol*, 1989. 66(1): p. 8-13.

Endereço para correspondência:

Paulo Marchetti - Av. Yervant Kissajikian, 299, apto. 93 - Vila Constância - São Paulo-SP - CEP- 04657-000.
E-mail: phm@usp.br