



# O limiar de esforço percebido (LEP) corresponde à potência crítica e a um indicador de máximo estado estável de consumo de oxigênio

Fábio Yuzo Nakamura<sup>1,2,3,4</sup>, Antônio Fernando Brunetto<sup>3</sup>, Daniel Müller Hirai<sup>3</sup>, Bruno Tesini Roseguini<sup>3</sup> e Eduardo Kokubun<sup>2</sup>

## RESUMO

O esforço percebido tem sido alvo de diversas investigações, geralmente associando-o a indicadores fisiológicos objetivos no exercício. Recentemente, foi proposta a identificação do limiar de esforço percebido (LEP) em corrida aquática, o qual não diferiu da velocidade crítica. Em tese, ambos os parâmetros seriam indicadores de máximo estado estável de variáveis como o  $\dot{V}O_2$  e lactato sanguíneo. Este trabalho teve como objetivo verificar a coincidência entre LEP, potência crítica (PCrit) e um indicador de máximo estado estável de  $\dot{V}O_2$  (PCrit') em cicloergômetro. Oito participantes do sexo masculino foram submetidos a teste de esforço progressivo, para determinação do  $\dot{V}O_{2\text{pico}}$  ( $46,7 \pm 8,5 \text{ ml/kg/min}$ ), e a quatro testes retangulares exaustivos para estimativa dos parâmetros do modelo de potência crítica, LEP e PCrit'. A relação hiperbólica entre potência mecânica e tempo até que o  $\dot{V}O_{2\text{pico}}$  fosse alcançado em cada teste foi utilizada para a estimativa da PCrit', tida como a assíntota no eixo da potência, e a porção da capacidade de trabalho anaeróbio (CTAnaer) depletada até o estabelecimento do  $\dot{V}O_{2\text{pico}}$  (CTAnaer'). Para identificar o LEP, os coeficientes angulares das retas do aumento do esforço percebido no tempo (ordenada) e as potências utilizadas (abscissa) foram ajustados a uma função linear que fornecia um ponto no eixo da potência em que o esforço percebido seria mantido estável indefinidamente. Os parâmetros PCrit e CTAnaer foram estimados por meio da equação não linear potência-tempo. Para comparação das estimativas de LEP, PCrit e PCrit' foi empregada ANOVA para medidas repetidas e as associações foram estabelecidas por correlação de Pearson. CTAnaer e CTAnaer' foram comparadas por teste t. O LEP ( $180 \text{ W} \pm 61 \text{ W}$ ), PCrit ( $174 \text{ W} \pm 43 \text{ W}$ ) e PCrit' ( $176 \text{ W} \pm 48 \text{ W}$ ) não diferiram significativamente e as correlações foram de 0,92-0,98. CTAnaer' ( $14.080 \pm 5.219 \text{ J}$ ) foi menor que CTAnaer ( $22.093 \pm 9.042 \text{ J}$ ). Conclui-se que o LEP prediz de forma acurada a intensidade de PCrit e PCrit'.

**Palavras-chave:** Esforço percebido. Potência crítica. Máximo estado estável de  $\dot{V}O_2$ .

**Key words:** Perceived exertion. Critical power. Maximum  $\dot{V}O_2$  steady state.

**Palabras-clave:** Esfuerzo percibido. Potencia crítica. Máximo estado estable de  $\dot{V}O_2$ .

## ABSTRACT

**The perceived exertion threshold (PET) corresponds to the critical power and to an indicator of maximal oxygen uptake steady state**

The perceived exertion has been a target of several investigations, many times with association with objective physiological indicators in exercise. Recently, the identification of the perceived exertion threshold (PET) was proposed in the water running, which presented no difference in relation to the critical velocity. Theoretically, both parameters would be indicators of the maximum steady state of variables such as  $\dot{V}O_2$  and blood lactate. The objective of this work was to verify the coincidence between PET, critical power (PCrit) and an indicator of maximum  $\dot{V}O_2$  steady state (PCrit') in cycle ergometer. Eight male participants were submitted to progressive effort test in order to determine  $\dot{V}O_{2\text{peak}}$  ( $46.7 \pm 8.5 \text{ ml/kg/min}$ ) and to four rectangular tests until exhaustion for the estimation of the critical power model parameters, PET and PCrit'. The hyperbolic relation between mechanical power and time spent for the  $\dot{V}O_{2\text{peak}}$  to be reached in each test was used for the PCrit' estimation, considered as the asymptote in the power axis, and the portion of the anaerobic work capacity (CTAnaer) depleted up to the establishment of the  $\dot{V}O_{2\text{peak}}$  (CTAnaer'). In order to identify PET, the straight lines angular coefficients of the perceived exertion in time (ordinate) and the powers used (abscissa) were adjusted to a linear function that provided a point in the power axis in which the perceived exertion would be kept indefinitely stable. The parameters PCrit and CTAnaer were estimated by means of the power-time non-linear equation. In order to compare the estimations of PET, PCrit and PCrit', the analysis of variance ANOVA for repeated measurements was employed, and the associations were established through the Pearson correlation. CTAnaer and CTAnaer' were compared through the t test. PET ( $180 \text{ W} \pm 61 \text{ W}$ ), PCrit ( $174 \text{ W} \pm 43 \text{ W}$ ) and PCrit' ( $176 \text{ W} \pm 48 \text{ W}$ ) were not significantly different and the correlations were of 0.92-0.98. CTAnaer' ( $14,080 \pm 5,219 \text{ J}$ ) was lower than CTAnaer ( $22,093 \pm 9,042 \text{ J}$ ). One concludes that the PET predicts the intensity of PCrit and PCrit' with accuracy.

## RESUMEN

**El umbral de esfuerzo percibido (UEP) corresponde a la potencia crítica y a un indicador de máximo estado estable de consumo de oxígeno**

El esfuerzo percibido viene sido blanco de diversas investigaciones, generalmente asociándolo a indicadores fisiológicos objetivos en el ejercicio. Recientemente, fué propuesta a la identifica-

1. Grupo de Estudo e Pesquisa em Metabolismo, Nutrição e Exercício, Centro de Educação Física e Desportos. Universidade Estadual de Londrina – Londrina/PR.
2. Instituto de Biociências, Departamento de Educação Física, Universidade Estadual Paulista – Rio Claro/SP.
3. Laboratório de Fisioterapia Pulmonar – Universidade Estadual de Londrina/PR.
4. Grupo de Estudo das Adaptações Fisiológicas ao Treinamento (GEAFIT), Centro de Educação Física e Desportos, Universidade Estadual de Londrina.

Recebido em 19/2/05. 2ª versão recebida em 2/5/05. Aceito em 4/5/05.

**Endereço para correspondência:** Fábio Yuzo Nakamura, Grupo de Estudo e Pesquisa em Metabolismo, Nutrição e Exercício, Centro de Educação Física e Desportos, Universidade Estadual de Londrina, Rod. Celso Garcia Cid, km 380, Campus Universitário – 86051-990 – Londrina, PR – Brasil. E-mail: fabioy\_nakamura@yahoo.com.br

ción del umbral de esfuerzo percibido (UEP) en carrera acuática, e la cual no difirió de la velocidad crítica. En teoría, ambos parámetros serían indicadores de máximo estado estable de variables como el  $\dot{V}O_2$  y el lactato sanguíneo. Este trabajo ha tenido como objetivo verificar la coincidencia entre UEP, potencia crítica (PCrit) y un indicador de máximo estado estable de  $\dot{V}O_2$  (PCrit') en cicloergómetro. Ocho participantes de sexo masculino fueron sometidos a test de esfuerzo progresivo para determinación del  $\dot{V}O_{2pico}$  ( $46,7 \pm 8,5$  ml/kg/min), y a cuatro tests rectangulares exhaustivos para estimar los parámetros del modelo de potencia crítica, UEP y PCrit'. La relación hiperbólica entre potencia mecánica y tiempo hasta que el  $\dot{V}O_{2pico}$  fuera alcanzado en cada test fué utilizada para la estimativa de la PCrit', tenida como la asíntota en el eje de la potencia y la porción de la capacidad de trabajo anaeróbico (CTAnaer) depletada hasta el establecimiento del  $\dot{V}O_{2pico}$  (CTAnaer'). Para identificar el UEP, los coeficientes angulares de las rectas de aumento de esfuerzo percibido en el tiempo (ordenada) y de las potencias utilizadas (abscisas) fueron ajustados a una función lineal que sería mantenido estable indefinidamente. Los parámetros PCrit y CTAnaer fueron estimados por medio de la ecuación no lineal de potencia en función de tiempo. Para comparación de las estimativas de UEP, PCrit y PCrit' fué empleado ANOVA para las medidas repetidas, y las asociaciones fueron establecidas por correlación de Pearson. CTAnaer y CTAnaer' fueron comparadas por el test t. El UEP ( $180 \pm 61$ ), PCrit ( $174 \pm 43$ ) y PCrit' ( $176 \pm 48$ ) no difirieron significativamente, y las correlaciones de 0,92-0,98. CTAnaer' ( $14.080 \pm 5.219$  J) fué menor que CTAnaer ( $22.093 \pm 9.042$  J). Se concluye que el UEP predice de forma ajustada la intensidad de PCrit y PCrit'.

## INTRODUÇÃO

Recentemente, foi proposto que a percepção subjetiva de esforço poderia ser utilizada na determinação da velocidade crítica em corrida aquática<sup>(1)</sup>. Foi observado que o esforço percebido (Escala de Borg<sup>(2)</sup> de 15 pontos) aumentava de forma linear durante testes retangulares, a uma taxa proporcional à intensidade de corrida. Por meio de extrapolação linear da relação entre a velocidade e a taxa de aumento do esforço percebido foi possível a estimativa de uma intensidade em que, em tese, essa variável psicofísica seria mantida estável indefinidamente. Essa intensidade, denominada limiar de esforço percebido (LEP), não diferiu da velocidade crítica, sendo que ambas apresentaram alta correlação. A velocidade crítica de corrida terrestre, derivada do modelo de potência crítica de Monod e Scherrer<sup>(3)</sup>, corresponde à intensidade de máximo estado estável de  $\dot{V}O_2$ <sup>(4)</sup> e de lactato<sup>(5)</sup>. Ela é considerada, portanto, uma medida de capacidade aeróbia. Poucas são as investigações que procuraram conjugar o modelo de potência crítica com o esforço percebido<sup>(6,7)</sup>.

O esforço percebido parece resultar da integração de uma série de informações aferentes oriundas de estruturas sensoriais localizadas nos músculos esqueléticos ativos e no sistema cardiorrespiratório<sup>(2)</sup>. Essas estruturas seriam estimuladas primariamente pela acidade metabólica associada à queda do pH muscular e sanguíneo<sup>(8)</sup>, sobretudo porque as intensidades severas<sup>(9)</sup> empregadas na determinação do LEP induziriam um estado de não estabilidade da concentração de lactato nos diferentes compartimentos corporais. Com isso, a atividade neuromotora eferente teria que ser aumentada para compensar a fadiga periférica promovida pela falência contrátil e para aumentar a ventilação pulmonar, modulando também o esforço percebido<sup>(10)</sup>. Esse fenômeno compensatório pode ser comprovado pelo comportamento crescente da atividade eletromiográfica de músculos extensores do joelho durante cargas de trabalho severas constantes em cicloergómetro<sup>(11,12)</sup>. Levantou-se a hipótese<sup>(1)</sup> de que o aumento do esforço percebido seria proporcional ao esgotamento da capacidade de trabalho anaeróbico (CTAnaer), variável que também é prevista pelo modelo de potência crítica<sup>(3,13)</sup>, sendo definida como o estoque de energia prove-

niente das reservas de fosfagênicos e da mobilização da glicólise anaeróbia, que redundam na lactacidemia. Dessa forma, o esforço percebido teria relação estreita com os pressupostos do modelo de potência crítica.

Hill e Smith<sup>(14)</sup> propuseram uma técnica para estimar a intensidade associada ao máximo estado estável de  $\dot{V}O_2$ , também adotando alguns pressupostos do modelo. Segundo Gaesser e Poole<sup>(9)</sup>, essa intensidade demarca a transição entre os domínios intenso e severo de esforço. Hill e Smith<sup>(14)</sup> submetaram sujeitos a três testes retangulares em cicloergómetro que induziam a exaustão entre 1-10 minutos. Em cada teste, mediram o tempo necessário para que o  $\dot{V}O_{2pico}$  fosse atingido. A relação potência x tempo até  $\dot{V}O_{2pico}$  ( $t_{VO2pico}$ ) foi ajustada a uma função hiperbólica, equivalente à proposta por Monod e Scherrer<sup>(3)</sup>. A assíntota da hipérbole gerada equivaleria à potência em que o tempo para que o valor de  $\dot{V}O_{2pico}$  fosse atingido seria infinito. O grau de curvatura da hipérbole, em joules, seria a quantidade de energia anaeróbia média necessária para que o  $\dot{V}O_{2pico}$  fosse atingido em cada uma das cargas. Esse valor de trabalho mecânico é inferior à CTAnaer. Já a assíntota da relação potência x  $t_{VO2pico}$ , em média, não foi diferente da potência crítica (PCrit) do grupo, definida a partir da assíntota da relação entre potência x tempo até a exaustão. A validade da igualdade entre a PCrit e o máximo estado estável de  $\dot{V}O_2$ , medido diretamente, foi demonstrada por Poole *et al.*<sup>(15,16)</sup>. Em ambos os estudos, em exercício prolongado na PCrit houve estabilização do  $\dot{V}O_2$  em cerca de 80% de seu valor máximo, sendo que com incremento de apenas 5% de carga essa variável aumentou até atingir o  $\dot{V}O_{2pico}$ , precipitando a exaustão em poucos minutos. Portanto, a técnica de Hill e Smith<sup>(14)</sup> parece ter sustentação fisiológica.

A hipótese deste estudo era a de que o LEP constituiria uma medida indireta e alternativa da transição entre os domínios intenso e severo de esforço<sup>(9)</sup>, uma vez que nessa porção limítrofe entre domínios não só variáveis fisiológicas apresentariam estabilização ao longo do tempo, mas também a própria percepção de esforço que, pelos modelos atuais<sup>(17)</sup>, constitui uma representação central complexa e integrada das diversas funções corporais modificadas agudamente pelo exercício.

O objetivo deste estudo foi ampliar a descrição fisiológica do LEP, estendendo sua aplicação para uma forma de exercício (cicloergómetro) diferente da proposta originalmente (corrida aquática). Além disso, procurou-se verificar a equivalência do LEP estimado em cicloergómetro, em relação à PCrit e ao indicador de máximo estado estável de  $\dot{V}O_2$ , proposto por Hill e Smith<sup>(14)</sup>.

## MÉTODOS

### Sujeitos

Participaram do estudo oito indivíduos jovens do sexo masculino, com  $21,4 \pm 4,2$  anos de idade,  $180,0 \pm 5,4$ cm de estatura e  $74,5 \pm 4,9$ kg de massa corporal. Todos assinaram termo de consentimento livre e esclarecido para participar do estudo. Os procedimentos adotados nesta investigação foram aprovados pelo Comitê de Ética em Pesquisa da Unesp – Rio Claro.

### Teste para determinação do $\dot{V}O_{2pico}$ em teste de esforço progressivo

O teste de esforço progressivo foi conduzido em cicloergómetro com resistência mecânica *Monark*<sup>®</sup>. As variáveis ventilatórias foram determinadas com a utilização de um aparelho *VO2000* (Aerosport Inc.). O equipamento para análise de trocas gasosas foi calibrado antes de cada teste de esforço. A calibração foi feita a partir de amostra de gás ambiente (20,9% de  $O_2$  e 0,04% de  $CO_2$ ) e a partir de amostra proveniente de um cilindro com concentração conhecida de  $O_2$  (17%) e de  $CO_2$  (5%). Além disso, o fluxo de gases para o aparelho foi calibrado a partir de uma seringa de três litros, conforme padronização do fabricante. O aparelho foi ajusta-

do de forma a realizar as análises dos gases expirados a cada três incursões ventilatórias. A frequência cardíaca (FC) foi monitorada durante todo o teste no modo batimento-a-batimento por um cardiofrequencímetro Polar® modelo S810i.

Antes do início do teste, o participante permanecia sentado por três minutos sobre o ergômetro, para mensuração das variáveis ventilatórias e FC de repouso. Depois disso, pedalava por mais três minutos sem resistência externa. Sem pausa, o teste de esforço progressivo era conduzido com carga inicial de 20W, com incrementos de carga de 20W por minuto, até a exaustão voluntária. Havia incentivo verbal por parte dos investigadores. A média dos valores de  $\dot{V}O_2$  alcançados nas últimas seis medidas prévias à exaustão foi considerada como sendo o  $\dot{V}O_{2pico}$ . Para etapas posteriores deste estudo, calculou-se também o intervalo de confiança ( $IC_{95\%}$ ) dos valores finais de  $\dot{V}O_2$ .

O critério para que o valor de  $\dot{V}O_{2pico}$  fosse aceito era que a FC no último estágio do teste atingisse a faixa de  $\pm 10$ bpm em relação à máxima predita pela idade de cada sujeito, que a razão de trocas respiratórias (RER) superasse 1,1 e que o esforço subjetivo reportado a partir da escala de 15 pontos de Borg fosse superior a 19 nos instantes finais do teste. Não foi incluído o critério de platô do  $\dot{V}O_2$  porque os indivíduos não apresentaram evidências visuais de estabilização dessa variável no protocolo adotado.

### Testes para estimativa da PCrit e da CTAnaer

Cada indivíduo realizou quatro cargas retangulares no cicloergômetro Monark® com o objetivo de estimar os parâmetros do modelo de potência crítica. Todos os participantes haviam sido familiarizados ao ergômetro e ao tipo de esforço em duas sessões retangulares exaustivas, em dias prévios ao início das coletas de dados definitivos. Antes de cada teste havia um breve aquecimento de cinco minutos de duração com 30-40W de resistência. Após período de mesma duração para recuperação e preparação do sujeito, o teste era iniciado. Os testes eram separados por no mínimo 24h de intervalo, para que o cansaço residual não afetasse a carga seguinte. Solicitava-se que os participantes não realizassem esforços pesados entre os testes e que, de preferência, não ingerissem alimentos nas duas horas prévias à realização dos mesmos. As intensidades eram escolhidas individualmente de tal forma que os esforços tivessem duração entre 1-10 minutos<sup>(18)</sup>. Eventualmente, alguns sujeitos realizaram cargas cuja duração ultrapassou os 10 minutos. No entanto, nenhum dos testes durou mais que 15 minutos. Nenhum deles teve duração inferior a um minuto. Não era dada informação aos participantes quanto à intensidade das cargas e duração esperada dos testes. Devido à relativa heterogeneidade do grupo, as cargas retangulares empregadas tiveram entre 160 e 350W de potência média.

Os dados individuais de potência e tempo até a ocorrência da exaustão foram ajustados à equação não linear abaixo, para estimativa da PCrit e da CTAnaer. Em trabalhos anteriores<sup>(1,19)</sup>, apresentamos equações lineares aritmeticamente equivalentes para o cálculo dos parâmetros<sup>(20)</sup>. No entanto, optamos por utilizar apenas a equação 1 porque ela respeita o pressuposto matemático de alocação da potência como variável independente, e do tempo como variável dependente<sup>(21)</sup>, e essa configuração é compatível com a condição experimental adotada neste estudo.

$$Tempo = CTAnaer / (potência - PCrit) \quad (\text{equação 1})$$

### Estimativa da PCrit' e da CTAnaer'

Durante os testes para estimativa da PCrit e da CTAnaer, os indivíduos tiveram suas trocas gasosas pulmonares monitoradas pelo VO2000. Os procedimentos de calibração da concentração de gases e de seu fluxo para o aparelho foram os mesmos adotados quando da realização do teste de esforço progressivo. Novamente, o equipamento foi ajustado para realizar as análises a cada três incursões ventilatórias. Durante cada um dos testes exausti-

vos, foi registrado o tempo necessário para que o indivíduo atingisse seu  $\dot{V}O_{2pico}$  ( $t_{VO2pico}$ ), o qual foi determinado no teste de esforço progressivo. Devido às oscilações inerentes à medida de  $\dot{V}O_2$  feita em intervalos de tempo reduzidos, foi adotado como o tempo até o  $\dot{V}O_{2pico}$  o período decorrido até o primeiro momento em que essa medida alcançasse o  $IC_{95\%}$  do  $\dot{V}O_{2pico}$ . O critério adotado foi que, de cinco leituras consecutivas, ao menos três estivessem contidas no  $IC_{95\%}$ , estabelecido a partir das últimas seis medidas de  $\dot{V}O_2$  do teste de esforço progressivo. O tempo até a primeira leitura de  $\dot{V}O_2$  nessas condições foi registrado como o  $t_{VO2pico}$ . Essa tolerância foi permitida porque o  $\dot{V}O_2$  costuma alcançar valores assintóticos – platô – em testes no domínio severo justamente no momento em que atinge seu valor máximo. Dessa forma, é comum que algumas medidas nessa região da curva cinética de  $\dot{V}O_2$  oscilem para baixo, saindo temporariamente do  $IC_{95\%}$ . Além disso, próximo ao fim do teste, os participantes tendem a reduzir a velocidade de rotação do pedal por causa da fadiga, reduzindo momentaneamente a potência, o que pode causar leituras abaixo do intervalo de tolerância para que se considere o  $\dot{V}O_2$  como sendo de pico.

Os dados individuais de potência e  $t_{VO2pico}$  foram ajustados à equação 2 abaixo, equivalente à equação 1, para estimativa da PCrit' e da CTAnaer'.

$$T_{VO2pico} = CTAnaer' / (potência - PCrit') \quad (\text{equação 2})$$

onde PCrit' corresponde ao indicador de máximo estado estável de  $\dot{V}O_2$  e CTAnaer' corresponde ao trabalho mecânico proveniente dos estoques anaeróbios despendido até que o  $\dot{V}O_{2pico}$  seja alcançado<sup>(14)</sup>.

### Estimativa do LEP

Durante os quatro testes exaustivos, os indivíduos foram instruídos a reportar o esforço percebido de acordo com a escala de 15 pontos de Borg, a cada 30s de exercício. O coeficiente angular da reta de regressão entre o tempo como variável independente e os valores individuais de esforço percebido atribuídos durante cada um dos testes foi determinado através da regressão linear. Os coeficientes angulares das quatro retas (taxa de aumento do esforço percebido) obtidos com este procedimento foram utilizados para estimar os parâmetros da reta de regressão linear em função da potência gerada nos quatro testes. O LEP foi definido como a intensidade que corresponde ao ponto de intersecção da reta de regressão no eixo da potência (x), ou seja, equivaleria à intensidade em que a taxa de aumento do esforço percebido seria zero. As figuras 2 e 3 exemplificam estes procedimentos em um indivíduo representativo.

### Tratamento estatístico

Os parâmetros PCrit, PCrit', CTAnaer e CTAnaer' foram estimados pelas equações 1 e 2 por meio de procedimento de regressão não linear. A comparação entre as estimativas de PCrit, PCrit' e LEP foi feita por análise de variância (ANOVA) para medidas repetidas. Os valores de CTAnaer e CTAnaer' foram comparados por teste t para amostras pareadas. O coeficiente de correlação de Pearson foi utilizado para verificar as associações entre as estimativas de PCrit, PCrit' e LEP. O nível de significância preestabelecido em todas as análises foi de  $P < 0,05$ .

## RESULTADOS

O  $\dot{V}O_{2pico}$  alcançado no teste de esforço progressivo pela amostra estudada foi de  $46,7 \pm 8,5$ ml/kg/min. Em média, os testes retangulares para a predição dos parâmetros do modelo de potência crítica, da PCrit' e CTAnaer', e do LEP, tiveram valores de potência equivalentes a  $216 \pm 35$ W,  $239 \pm 40$ W,  $262 \pm 40$ W e  $288 \pm 41$ W, quando ordenadas de forma crescente. As respectivas durações foram de  $547 \pm 121$ s,  $364 \pm 52$ s,  $263 \pm 49$ s e  $182 \pm 35$ s.

A figura 1 (curva superior) ilustra a relação hiperbólica entre a potência e o tempo até a exaustão de um sujeito representativo da amostra. Na mesma figura (curva inferior), está representada a relação entre a potência e o tempo para que o  $\dot{V}O_{2\text{pico}}$  fosse alcançado em cada teste. Nesse indivíduo, houve coincidência entre as assíntotas. No grupo como um todo, o comportamento foi semelhante, já que PCrit e PCrit' não diferiram de forma significativa ( $P > 0,05$ ) (tabela 1). A correlação entre esses dois parâmetros foi de 0,96. A CTAnaer' e a CTAnaer foram equivalentes a  $14.080 \pm 5.219$  e  $22.093 \pm 9.042\text{J}$ , respectivamente.

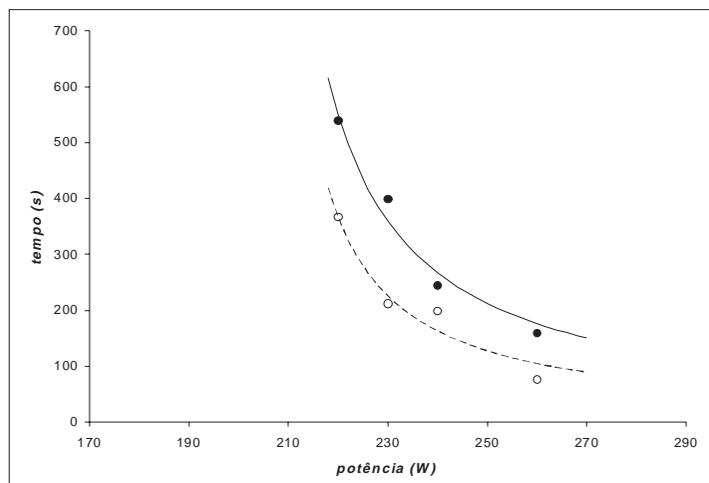


Fig. 1 – Relação entre potência e tempo até a exaustão (círculos cheios e linha contínua) e entre a potência e o tempo até que o  $\dot{V}O_{2\text{max}}$  fosse alcançado (círculos vazios e linha descontinua), de um sujeito representativo com mesma assíntota no eixo x para ambas as curvas

TABELA 1  
Valores médios ( $\pm$  dp) dos valores de potência crítica (PCrit), do indicador de máximo estado estável de  $\dot{V}O_2$  (PCrit'), e de limiar de esforço percebido (LEP)

PCrit (W)	PCrit' (W)	LEP (W)
174 $\pm$ 43	176 $\pm$ 48	180 $\pm$ 61

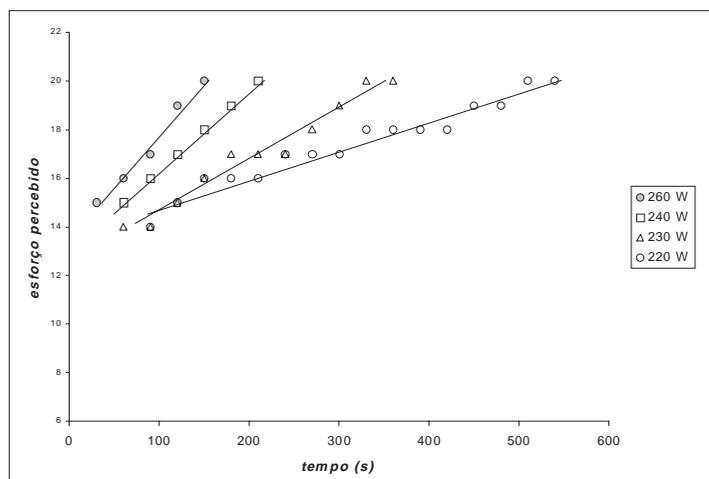


Fig. 2 – Aumento do esforço percebido ao longo do tempo, em quatro testes retangulares exaustivos, de um sujeito representativo

A figura 2 mostra a comportamento do esforço percebido ao longo do tempo durante os quatro testes retangulares de um sujeito da amostra. Pode-se observar um bom ajuste linear dessa variável em função da duração de cada teste ( $r^2$  entre 0,89 a 1,00).

Em alguns casos, a inspeção visual mostrava que o primeiro valor de esforço percebido reportado não se adequava à reta de regressão formada pelo restante dos pontos experimentais. Nesse caso, ele era excluído da análise, o que geralmente aumentava o valor de  $r^2$ . Havia também ocasiões em que os últimos pontos se repetiam no número 20, que é o valor máximo da escala. Isso geralmente ocorria no teste mais longo. Esses pontos também enfraqueciam a tendência à linearidade do restante da curva. Assim, eles também eram eliminados a fim de que a porção linear da curva fosse descrita com melhor ajuste pela equação de regressão.

O LEP calculado, conforme exemplo de um caso mostrado pela figura 3, não diferiu de forma significativa ( $P > 0,05$ ) da PCrit e da PCrit' (tabela 1). Houve alta correlação do LEP com a PCrit ( $r = 0,98$ ) e com a PCrit' ( $r = 0,92$ ).

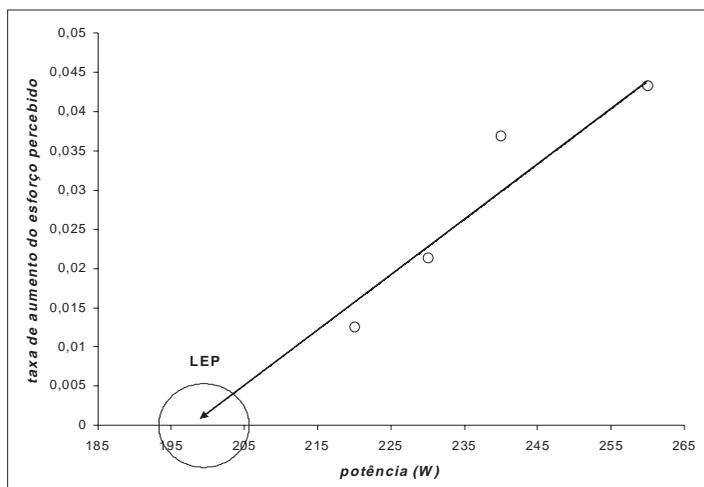


Fig. 3 – Determinação do limiar de esforço percebido (LEP) através da relação linear entre a taxa de aumento do esforço percebido e a potência, de um sujeito representativo

## DISCUSSÃO

Segundo Gaesser e Poole<sup>(9)</sup>, três domínios de esforço podem ser discriminados a partir do comportamento cinético de algumas variáveis fisiológicas no exercício. O primeiro domínio, denominado moderado, engloba as intensidades de esforço que podem ser sustentadas sem a indução de acidose láctica; abaixo, portanto, do limiar de lactato. Nesse domínio, o  $\dot{V}O_2$  apresenta um aumento monoexponencial nos primeiros 180 segundos de carga retangular, atingindo estado estável após esse período. O domínio de exercício intenso tem como limite inferior a carga de trabalho na qual o balanço entre produção e remoção de lactato pende transitóriamente para o primeiro e tem, como limite superior, a carga referente ao máximo estado estável de lactato, que coincide com a PCrit. Nesse domínio, após os 80-110s iniciais do exercício, um componente lento da cinética de  $\dot{V}O_2$  sobrepõe-se ao componente mais rápido, fazendo com que haja um atraso em sua estabilização. Esse volume adicional de oxigênio consumido em função do tempo provoca a perda da linearidade da relação entre  $\dot{V}O_2$  de estado estável e carga, observada no domínio moderado. No terceiro domínio, denominado severo, não há estabilização nem do  $\dot{V}O_2$  tampouco do lactato. Ambos os parâmetros aumentam de maneira inexorável até a ocorrência da exaustão, sendo que o  $\dot{V}O_2$  atinge invariavelmente seu valor máximo.

No modelo teórico apresentado por Gaesser e Poole<sup>(9)</sup>, não está prevista a ocorrência de máximo estado estável do esforço percebido na intensidade correspondente à PCrit. Entretanto, devido ao fato do esforço percebido ser entendido atualmente como uma representação central complexa e integrada das diversas funções corporais modificadas agudamente pelo exercício<sup>(17)</sup>, pode-se infe-

rir que seu comportamento ao longo do tempo assemelhe-se ao do lactato e  $\dot{V}O_2$ , na intensidade de transição entre os domínios intenso e severo. Assim, o objetivo principal deste trabalho foi testar essa hipótese de forma indireta, por meio da comparação entre o LEP, PCrit e um indicador de máximo estado estável de  $\dot{V}O_2$ . Para nosso conhecimento, essa aplicação do esforço percebido por meio da escala da Borg de 15 pontos é original. Porém, outros autores têm proposto técnicas para estimar indicadores de capacidade aeróbia com a utilização de escalas subjetivas de esforço, inclusive com a adoção dos pressupostos do modelo de potência crítica.

Capodaglio e Saibene<sup>(6)</sup> utilizaram a escala de esforço percebido de 10 pontos de Borg – CR10<sup>(2)</sup>, para estimar a potência mecânica sustentável em atividades da vida diária de idosos, tanto em cicloergômetro para membros superiores quanto para membros inferiores. Essa intensidade é inferior à PCrit tradicionalmente estimada a partir de testes exaustivos em idosos<sup>(22,23)</sup>. Os testes propostos por Capodaglio e Saibene<sup>(6)</sup> não eram conduzidos até a exaustão voluntária, mas sim até o momento em que a percepção de esforço atingia o nível “forte”, com valor 5 na escala CR10 de Borg. Os valores de trabalho mecânico e tempo até esse ponto em 5-6 testes eram ajustados à equação linear trabalho-tempo<sup>(20)</sup>. A inclinação da reta de regressão era considerada como a intensidade sustentável para as atividades diárias. Ela correspondia a cerca de 55% da potência máxima, alcançada pelos membros inferiores, sendo facilmente mantida por 30 minutos, com frequência cardíaca de aproximadamente 114bpm, com elevação reduzida de lactato no sangue (2,2mM), com concentração próxima à associada com a ocorrência do limiar de lactato.

Em outro trabalho, Garcin *et al.*<sup>(7)</sup> mostraram que o esforço percebido reportado na musculatura ativa, no quinto minuto das cargas preditivas dos parâmetros do modelo de potência crítica em cicloergômetro e em exercício de extensão de joelhos, correlacionou-se negativamente ( $r = -0,78$  e  $-0,80$ ) com o logaritmo do tempo até a exaustão. Além disso, correlacionou-se positivamente ( $r = 0,76$  e  $0,85$ ) com o percentual da PCrit utilizado no teste e com a atividade eletromiográfica no mesmo instante de coleta ( $r = 0,70$  e  $0,58$ ). Dessa forma, os autores concluíram que o esforço percebido em um ponto fixo (a cinco minutos) de testes exaustivos poderia ser considerado um indicador de capacidade aeróbia, pois prediz a tolerância ao esforço, a magnitude de utilização da CTAnaer e o grau de ativação neuromuscular, relacionado à fadiga.

Por fim, Okura e Tanaka<sup>(24)</sup> também procuraram estimar um indicador submáximo de capacidade aeróbia, o limiar ventilatório, por meio da utilização de uma escala de 15 pontos de Borg. Sujeitos de um grupo de validação realizaram teste incremental (90kgm/min) em cicloergômetro mecânico até se alcançar o valor 15 de esforço percebido localizado nas pernas, pela referida escala. Juntamente com a idade, a carga de ocorrência do valor 15, expressa em  $mLO_2/min$ , foi ajustada a uma equação pelo procedimento de regressão múltipla para a predição do limiar ventilatório. A equação se mostrou satisfatória, pois o erro padrão de estimativa do limiar ventilatório estimado em relação ao observado, em termos percentuais, foi de apenas 13,3%. Além disso, o grupo de validação cruzada obteve bons índices de predição do limiar ventilatório a partir da utilização da equação proposta. No entanto, ressalta-se que esse tipo de procedimento para proposição de equações preditivas de indicadores de capacidade aeróbia a partir do esforço percebido é protocolo-dependente, ou seja, a utilização de um protocolo de teste diferente do originalmente proposto deve gerar estimativas distanciadas das reais.

Nenhum dos estudos citados acima teve como objetivo estimar a intensidade de exercício correspondente ao máximo estado estável de  $\dot{V}O_2$  a partir do esforço percebido, que denota a transição de domínios de esforço. Além disso, em nenhum deles adotou-se um protocolo de coleta dos dados que contemplasse o acompanhamento de todo o comportamento da curva de esforço percebido

do x tempo, já que se utilizaram ou de esforço percebido submáximo fixo para finalização do teste, ou de tempo fixo, sem exaustão. Os autores dos trabalhos mencionados não atribuíram ao esforço percebido um significado fisiológico ou psicofísico bem definido, que permitisse o estabelecimento de uma relação causal com outras variáveis relevantes no exercício.

No entanto, de acordo com hipóteses anteriormente levantadas em nosso estudo<sup>(1)</sup>, a estimativa do LEP baseia-se no pressuposto de que o aumento do esforço percebido ocorreria a uma taxa dependente do acúmulo de  $H^+$ , resultante da utilização da CTAnaer. Essa perturbação periférica geraria uma necessidade de aumento dos estímulos eferentes para os músculos ativos, confirmada pelo aumento da atividade eletromiográfica reportado em protocolos de exercício similares ao nosso<sup>(11,12)</sup>. Ambas as fontes de informação (aferente e eferente) seriam potenciais alimentadores da geração da resposta perceptiva<sup>(10)</sup>. Portanto, a taxa de aumento do esforço percebido igual a zero estaria associada a um estado de exercício em que não haveria utilização das reservas anaeróbias, o qual coincidiria com a PCrit e com o máximo estado estável de  $\dot{V}O_2$ .

De fato, os resultados deste estudo parecem confirmar essas hipóteses. Os valores de PCrit e PCrit' e LEP foram respectivamente iguais a  $174 \pm 43$ ,  $176 \pm 48$  e  $180 \pm 61W$ , não diferindo de forma significativa ( $P > 0,05$ ). Além disso, as correlações entre eles foram altas ( $r = 0,92 - 0,98$ ). A CTAnaer' e CTAnaer foram estimadas em  $14.080 \pm 5.219$  e  $22.093 \pm 9.042J$ , respectivamente. O fato da CTAnaer' ter sido significativamente menor que a CTAnaer indica que uma porção relativamente fixa da reserva anaeróbia muscular deve ser utilizada para que o  $\dot{V}O_{2pico}$  seja alcançado e que uma outra porção dessa reserva é utilizada após o  $\dot{V}O_{2pico}$  já ter sido atingido, causando a exaustão. Não está claro o significado fisiológico desse achado.

De acordo com Hughson *et al.*<sup>(25)</sup>, o “sinal de erro” para o sistema cardiorrespiratório aumentar o  $\dot{V}O_2$  é estabelecido pela diferença entre o valor atual e o requerido para a manutenção da taxa metabólica fixada pelo exercício. No exercício severo, esses valores nunca se igualam. Um rápido ajuste do  $\dot{V}O_2$  é desejável, na medida em que se minimiza a velocidade de acúmulo do déficit de  $O_2$ , gerando menores níveis de ácido láctico. No entanto, esses ajustes são limitados pela capacidade do sistema cardiovascular em redistribuir rapidamente o fluxo sanguíneo e manter a pressão arterial em níveis adequados, fazendo com que a cinética de aumento do  $\dot{V}O_2$ , dada pela constante de tempo ( $\tau$ ), seja mais lenta nos exercícios severos do que nas intensidades moderadas<sup>(25)</sup>, sobretudo quando se aproxima o platô do  $\dot{V}O_2$  nos testes retangulares severos<sup>(26)</sup>. Com isso, parece que o aumento do  $\dot{V}O_2$  do repouso até seu valor máximo em exercício retangular no domínio severo é gerado por um “sinal de erro”, associado a um custo anaeróbio fixo (~64% da CTAnaer). A persistência do “sinal de erro” leva ao esgotamento da CTAnaer e aumento linear do lactato no sangue. Abaixo da PCrit, esse custo anaeróbio é minimizado, pois em algum momento do exercício o sinal de erro fisiológico parece ser igualado a zero, permitindo a estabilização das variáveis fisiológicas e psicofísicas indicadoras de trabalho interno do organismo.

Os testes retangulares, conduzidos neste estudo para estimativa do LEP, PCrit, e PCrit' e das variáveis anaeróbias, geraram os valores de  $\dot{V}O_{2pico}$  individuais, em todos os casos apresentados. Vale ressaltar, no entanto, que um indivíduo foi eliminado da amostra porque não foi capaz de atingir valores próximos do  $IC_{95\%}$  estabelecido no teste de esforço progressivo, em nenhuma das cargas exaustivas. Dessa forma, pode-se inferir que nem todos os indivíduos respondem ao exercício de forma a permitir a identificação da PCrit' e da CTAnaer'. Com isso, consideramos o LEP uma estimativa alternativa da máxima intensidade de estabilização do  $\dot{V}O_2$ , em cicloergômetro, já que os resultados encontrados sustentam essa equivalência.

Diferenças metodológicas entre nosso estudo e o conduzido por Hill e Smith<sup>(14)</sup> podem ser destacadas. Naquele estudo, as coletas de  $\dot{V}O_2$  eram feitas a cada 15s, e o  $\dot{V}O_{2\text{pico}}$  era considerado o maior valor médio de 30s (duas amostras) durante cada carga. O  $t_{\dot{V}O_{2\text{pico}}}$  era tido como o tempo decorrido do início da carga retangular até o meio do intervalo de 15s em que o  $\dot{V}O_{2\text{pico}}$  era alcançado. Já no presente estudo, optamos por adotar um valor fixo de  $\dot{V}O_{2\text{pico}}$  medido em teste de esforço progressivo, com tolerância dada pelo  $IC_{95\%}$ . Em adição, as amostras de gases expirados para cálculo do  $\dot{V}O_2$  foram feitas a cada três incursões ventilatórias, fazendo com que os intervalos entre os registros da variável fisiológica não fossem regulares. Ainda assim, resultados semelhantes foram obtidos nas duas investigações com relação à igualdade da PCrit e PCrit'.

Uma limitação deste estudo foi a ausência de sessões de exercício retangular prolongado na intensidade correspondente a PCrit, PCrit' e LEP, visando a comprovar a estabilização do  $\dot{V}O_2$  a níveis abaixo do  $\dot{V}O_{2\text{max}}$  e do esforço percebido em valores inferiores a 20, que é o maior valor possível na escala de Borg de 15 pontos. É possível que, na intensidade associada a esses indicadores fisiológicos de capacidade aeróbia, o esforço percebido não apresentaria estado estável, o que necessariamente não inviabilizaria as conclusões deste estudo. Pode-se especular que o aumento do esforço percebido ao longo do exercício fora do domínio severo (intenso e moderado) dar-se-ia por outros fatores, como depleção de glicogênio e aumento da temperatura corporal, e não pela utilização da CTAnaer. Além disso, a medida do sinal eletromiográfico durante as cargas preditivas severas e durante as sessões retangulares na transição entre os domínios intenso e severo poderia fornecer algumas pistas sobre a relação causal entre a ativação neuromuscular e o esforço percebido. Em estudos futuros, pretendemos testar essas condições experimentais.

Do ponto de vista prático, o LEP parece ser uma alternativa interessante na predição da PCrit e do máximo estado estável de  $\dot{V}O_2$ . Todos esses indicadores são associados à capacidade aeróbia dos indivíduos, podendo ser empregados em sua avaliação, no monitoramento de alterações induzidas pelo treinamento e também como parâmetro para a prescrição de treinamento aeróbio. A vantagem da utilização do LEP em relação à técnica proposta por Hill e Smith<sup>(14)</sup> para a estimativa da PCrit' é a sua simplicidade, dispensando o uso de quaisquer equipamentos, e por permitir o acompanhamento do esforço subjetivo empreendido pelos sujeitos em diferentes cargas, o qual constitui uma resposta integrada das condições internas de estresse impostas pelo exercício. Em termos teóricos, parece que a validade do LEP implica em adição de novos elementos ao modelo de potência crítica, tradicionalmente investigado como um modelo puramente energético, tendo também impacto na noção de transição de domínios de esforço<sup>(9)</sup>. O sinal de erro de Hughson *et al.*<sup>(25)</sup> na indução de aumento do  $\dot{V}O_2$ , reduzido concomitantemente à utilização de parte da CTAnaer também merece atenção em estudos futuros dentro da área.

## CONCLUSÕES

Os resultados do presente estudo corroboram os achados originais de Nakamura *et al.*<sup>(1)</sup> em corrida aquática, de que o LEP pode ser uma medida alternativa da PCrit, estimada neste estudo por meio de testes em cicloergômetro. Além disso, essas variáveis foram equivalentes também ao indicador de máximo estado estável de  $\dot{V}O_2$ , ou PCrit'. Dessa forma, conclui-se que o LEP constitui uma técnica indireta para a determinação da transição entre os domínios intenso e severo de esforço<sup>(9)</sup>, em que teoricamente as variáveis fisiológicas, que incluem o  $\dot{V}O_2$ , e as variáveis psicofísicas (esforço percebido) teriam comportamento estável, permitindo a realização de exercício prolongado.

## AGRADECIMENTO

À Capes, pela concessão de bolsa de estudos em nível de doutorado para o primeiro autor do trabalho.

*Todos os autores declararam não haver qualquer potencial conflito de interesses referente a este artigo.*

## REFERÊNCIAS

1. Nakamura FY, Gancedo MR, Albuquerque da Silva L, Lima JRP, Kokubun E. Utilização do esforço percebido na determinação da velocidade crítica em corrida aquática. *Rev Bras Med Esporte* 2005;11:1-5.
2. Borg GAV. Psychophysical bases of perceived exertion. *Med Sci Sports Exerc* 1982;14:377-81.
3. Monod H, Scherrer J. The work capacity of a synergic muscular group. *Ergonomics* 1965;8:329-38.
4. Hill DW, Ferguson CS. A physiological description of critical velocity. *Eur J Appl Physiol* 1999;79:290-3.
5. Sid-Ali B, Vandewalle H, Chair K, Moreaux A, Monod H. Lactate steady state and distance-exhaustion time relationship in running. *Arch Int Physiol Biochim* 1991; 99:297-301.
6. Capodaglio EM, Saibene F. A test to assess the mechanical power sustained during everyday activities in older people. *Age Ageing* 2003;32:31-6.
7. Garcin M, Vautier JF, Vandewalle H, Monod H. Ratings of perceived exertion (RPE) as an index of aerobic endurance during local and general exercises. *Ergonomics* 1998;41:1105-14.
8. Robertson RJ, Falkel JE, Drash AM, Swank AM, Metz KF, Spungen SA, et al. Effects of blood pH on peripheral and central signals of perceived exertion. *Med Sci Sports Exerc* 1986;18:114-22.
9. Gaesser GA, Poole D. The slow component of oxygen uptake kinetics in humans. *Exerc Sport Sci Rev* 1996;24:35-70.
10. Cafarelli E. Peripheral contributions to the perception of effort. *Med Sci Sports Exerc* 1982;14:382-9.
11. DeVries HA, Moritani T, Nagata A, Magnussen K. The relation between critical power and neuromuscular fatigue as estimated from electromyographic data. *Ergonomics* 1982;25:738-91.
12. Le Chevalier JM, Vandewalle H, Thépaut-Mathieu C, Stein JF, Caplan L. Local critical power is an index of local endurance. *Eur J Appl Physiol* 2000;81:120-7.
13. Moritani T, Nagata A, DeVries HA, Muro M. Critical power as a measure of physical work capacity and anaerobic threshold. *Ergonomics* 1981;24:339-50.
14. Hill DW, Smith JC. Determination of critical power by pulmonary gas exchange. *Can J Appl Physiol* 1999;24:74-86.
15. Poole DC, Ward SA, Gardner GW, Whipp BJ. Metabolic and respiratory profile of the upper limit for prolonged exercise in man. *Ergonomics* 1988;31:1265-79.
16. Poole DC, Ward SA, Whipp BJ. The effects of training on the metabolic and respiratory profile of high-intensity cycle ergometer exercise. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1990;59:421-9.
17. St Clair Gibson A, Baden BA, Lambert MI, Lambert EV, Harley YX, Hampson D, Russell VA, Noakes TD. The conscious perception of sensation of fatigue. *Sports Med* 2003;33:167-76.
18. Poole DC. Letter to the editor-in-chief. *Med Sci Sports Exerc* 1986;26:1335-40.
19. Nakamura FY, Borges TO, Sales OR, Cyrino ES, Kokubun E. Estimativa do custo energético e contribuição das diferentes vias metabólicas na canoagem de velocidade. *Rev Bras Med Esporte* 2004;10:70-7.
20. Hill DW. The critical power concept: a review. *Sports Med* 1993;16:237-54.
21. Gaesser GA, Carnevale TJ, Garfinkel A, Walter DO, Womack CJ. Estimation of critical power with nonlinear and linear models. *Med Sci Sports Exerc* 1995;27: 1430-8.
22. Overend TJ, Cunningham DA, Paterson DH, Smith WDF. Physiological responses of young and elderly men to prolonged exercise at critical power. *Eur J Appl Physiol* 1992;64:187-93.
23. Nader JA, Jones PW, Nery LE, Whipp BJ. The effect of age on the power/duration relationship and the intensity-domain limits in sedentary men. *Eur J Appl Physiol* 2000;82:326-32.
24. Okura T, Tanaka K. A unique method for predicting cardiorespiratory fitness using rating of perceived exertion. *J Physiol Anthropol Appl Human Sci* 2001;20: 255-61.
25. Hughson RL, O'Leary DD, Betik AC, Hebestreit H. Kinetics of oxygen uptake at the onset of exercise near or above peak oxygen uptake. *J Appl Physiol* 2000; 88:1812-9.
26. Hill DW, Stevens EC. The  $\dot{V}O_2$  response at the onset of severe intensity exercise. *Can J Appl Physiol* 2001;26:350-5.