

**Artigo original**

Daniel Müller Hirai<sup>1</sup>  
Nilo Massaru Okuno<sup>1</sup>  
Luiz Augusto Buoro Perandini<sup>1</sup>  
Guilherme Morais Puga<sup>2</sup>  
Herbert Gustavo Simões<sup>2</sup>  
Fábio Yuzo Nakamura<sup>1</sup>

## CINÉTICA DO CONSUMO DE OXIGÊNIO DURANTE EXERCÍCIOS SUPRA-MÁXIMOS: APLICAÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS

### OXYGEN UPTAKE KINETICS DURING SUPRA-MAXIMAL EXERCISE: MATHEMATICAL MODELLING

#### RESUMO

A correta estimativa dos parâmetros da cinética do consumo de oxigênio é fundamental para a interpretação de seus mecanismos de controle e/ou limitação. O objetivo deste estudo foi caracterizar a cinética do consumo de oxigênio em intensidades supra-máximas realizadas em cicloergômetro a partir da utilização de dois modelos matemáticos distintos. Onze indivíduos saudáveis do sexo masculino (idade = 25,4 ± 4,9 anos, estatura = 177,0 ± 4,0 cm, massa corporal = 77,1 ± 11,3 kg,  $VO_{2max} = 40,3 \pm 6,3 \text{ mL.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$ ) realizaram quatro testes retangulares exaustivos de intensidades correspondentes a 100, 113, 133 e 153% $VO_{2max}$ . As constantes de tempo do componente primário da cinética do  $VO_2$  foram estimadas a partir dos modelos exponencial e semi-logarítmico e comparadas através de ANOVA para medidas repetidas e *post hoc* de Tukey, admitindo-se  $P < 0,05$ . A estimativa da demanda de oxigênio, necessária para o cálculo da constante de tempo pelo modelo semi-logarítmico, foi realizada mediante procedimento de regressão. O modelo exponencial forneceu menores valores de constante de tempo (35,1 ± 8,0s; 32,5 ± 7,4s; 29,6 ± 11,3s; 25,3 ± 7,5s) em relação ao modelo semi-logarítmico (107,9 ± 27,1s; 104,5 ± 24,3s; 114,1 ± 30,4s; 125,3 ± 24,9s) para todas as intensidades, respectivamente. A observação de comportamento conflitante da cinética do consumo de oxigênio a partir da aplicação de modelos matemáticos distintos sugere precaução na realização de inferências fisiológicas dos parâmetros obtidos em exercícios supra-máximos.

**Palavras-chave:** Cinética; Consumo de oxigênio; Exercício.

#### ABSTRACT

Precise estimation of oxygen uptake kinetics parameters is essential to understand its control and/or limit uptake mechanisms. The purpose of the present study was to characterize the oxygen uptake kinetics responses during supra-maximal cycle ergometer exercise using two modeling techniques. Eleven male subjects (age = 25.4 ± 4.9 years, height = 177.0 ± 4.0 cm, mass = 77.1 ± 11.3 kg,  $VO_{2max} = 40.3 \pm 6.3 \text{ mL.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$ ) performed a series of square-wave exercise transitions to exhaustion at intensities equivalent to 100, 113, 133 and 153% of  $VO_{2max}$ . The time constant of the primary component was estimated with an exponential and semi-logarithmic model, comparisons were made using repeated measures ANOVA and the Tukey *post hoc* tests, with statistical significance accepted when  $p < 0.05$ . In order to calculate the time constant by the semi-logarithmic model it is necessary to estimate oxygen demand, which was performed by means of a regression procedure. The exponential model resulted in lower values for the time constant (35.1 ± 8.0s; 32.5 ± 7.4s; 29.6 ± 11.3s; 25.3 ± 7.5s) compared to the semi-logarithmic model (107.9 ± 27.1s; 104.5 ± 24.3s; 114.1 ± 30.4s; 125.3 ± 24.9s) at all intensities. The observation of this conflicting oxygen uptake kinetics behavior depending upon which mathematical model is applied suggests that physiological inferences on the basis of parameters obtained during supra-maximal exercise should be made with caution.

**Key words:** Kinetics; Oxygen uptake; Exercise.

<sup>1</sup> Grupo de Estudo das Adaptações Fisiológicas ao Treinamento (GEAFIT). Centro de Educação Física e Esporte. Universidade Estadual de Londrina – Londrina/PR.  
<sup>2</sup> Universidade Católica de Brasília – Brasília/DF

## INTRODUÇÃO

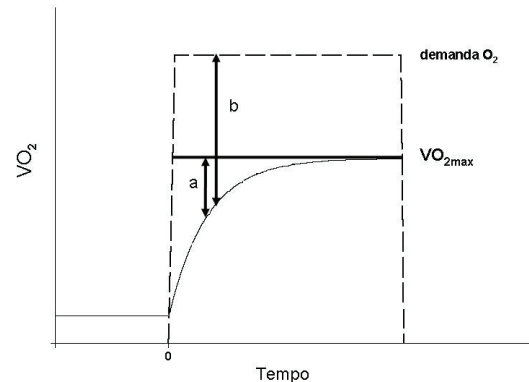
A compreensão das respostas da cinética do consumo de oxigênio ( $\text{VO}_2$ ) pode fornecer importantes informações acerca dos mecanismos de controle e/ou limitação do sistema cardiorrespiratório. A regulação deste sistema, no sentido de aumentar o  $\text{VO}_2$  durante o período de transição do repouso ao exercício, é estabelecida em função de um “sinal de erro” fisiológico. O “sinal de erro” fisiológico é definido como a diferença entre o valor atual e o valor requerido de  $\text{VO}_2$  (no estado estável) necessário para a manutenção da taxa metabólica fixada pelo exercício<sup>1</sup>. Portanto, o cálculo da constante de tempo ( $\tau$ ), que representa o tempo necessário para atingir 63% da resposta total, sofre influência direta da estimativa do “sinal de erro”.

Tradicionalmente, a cinética do  $\text{VO}_2$  tem sido descrita por meio de funções exponenciais. O modelo exponencial assume que o valor requerido, utilizado para a caracterização do sinal de erro, corresponde ao valor da assíntota observada de  $\text{VO}_2$ , em intensidade sub- $\text{VO}_{2\text{max}}$ . No entanto, durante exercícios supra-máximos, o valor requerido é superior à máxima assíntota possível de ser atingida ( $\text{VO}_{2\text{max}}$ ). Deste modo, ocorre restrição da magnitude do “sinal de erro” que, por sua vez, induz ao cálculo subestimado de  $\tau$ <sup>1,2</sup>. Em outras palavras, o ajuste cinético do  $\text{VO}_2$  aparenta ser muito rápido. Portanto, a aplicação do modelo exponencial em intensidades supra-máximas provavelmente estima parâmetros incorretos da cinética do  $\text{VO}_2$ , porque não assume como assíntota o valor do verdadeiro “sinal de erro” metabólico<sup>1</sup>.

Em contrapartida, a utilização do modelo semi-logarítmico<sup>1,2,3</sup> nestas intensidades pode contornar a restrição física imposta ao sinal de erro pelo  $\text{VO}_{2\text{max}}$ . Isto se deve à adoção de uma demanda de  $\text{O}_2$  supra-máxima predita (acima do  $\text{VO}_{2\text{max}}$ ) como equivalente ao valor requerido. O efeito dos pressupostos dos modelos exponencial e semi-logarítmico sobre o sinal de erro induzido pelo exercício pode ser observado na figura 1. Observa-se que o modelo semi-logarítmico apresenta projeção do valor requerido do  $\text{VO}_2$  superior ao assumido pelo modelo exponencial. Isso afeta a magnitude do “sinal de erro” fisiológico estimado.

Normalmente, a predição do valor de demanda de  $\text{O}_2$  supra-máxima é realizada mediante a extrapolação da porção sub-limiar de lactato da relação entre  $\text{VO}_2$  e intensidade de exercício. Entretanto, este procedimento não é apropriado porque assume linearidade entre  $\text{VO}_2$  e intensidade, negligenciando a existência do componente lento da cinética do  $\text{VO}_2$ <sup>4,5</sup> e resultando em valores subestimados da demanda de  $\text{O}_2$ . Apesar de severas críticas a este procedimento<sup>6</sup>, ele é comumente utilizado na estimativa do máximo déficit acumulado de oxigênio (MAOD)<sup>7,8</sup>, exigindo múltiplas sessões de exercício submáximo para estabelecimento da relação  $\text{VO}_2$  versus intensidade. Uma possível alternativa para a predição da demanda de  $\text{O}_2$  seria o emprego do método de Hill<sup>9</sup>, na qual não existe a necessidade de assumir linearidade entre  $\text{VO}_2$  e intensidade. Neste método, a

estimativa é realizada através de procedimentos de regressão, utilizando-se apenas os resultados de testes supra-máximos.



**Figura 1.** Representação esquemática do comportamento do “sinal de erro” metabólico em exercício retangular supra-máximo segundo diferentes modelos matemáticos. A linha horizontal contínua representa o valor do  $\text{VO}_{2\text{max}}$ , a linha horizontal tracejada a demanda de  $\text{O}_2$  supra-máxima, ( $t=0$ ) o tempo de início do exercício, (a) a magnitude do “sinal de erro” referente ao modelo exponencial e (b) a magnitude do “sinal de erro” referente ao modelo semi-logarítmico.

Desse modo, o objetivo do presente estudo foi caracterizar as respostas da cinética do  $\text{VO}_2$  durante exercício supra-máximo em cicloergômetro a partir de diferentes modelos matemáticos, a saber: o exponencial e o semi-logarítmico. No intuito de alcançar a melhor descrição fisiológica, a demanda de  $\text{O}_2$  supra-máxima foi estimada pelo método de Hill<sup>9</sup>, quando da aplicação do modelo semi-logarítmico.

## PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

### Sujeitos

Participaram deste estudo 11 indivíduos saudáveis, do sexo masculino, com  $25,4 \pm 4,9$  anos de idade,  $177,0 \pm 4,0$  cm de estatura e  $77,1 \pm 11,3$  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 local (nº 061/06).

Os sujeitos realizaram um teste de esforço progressivo para a determinação do  $\text{VO}_{2\text{max}}$ , além de quatro testes retangulares exaustivos para a estimativa dos parâmetros da cinética do  $\text{VO}_2$ . Foi realizada uma sessão de familiarização ao ergômetro e ao tipo de esforço, em dias prévios ao início das coletas de dados definitivos. Os participantes foram orientados a não executarem atividades físicas extenuantes no dia anterior e a não ingerirem alimentos nas duas horas prévias à realização dos testes. Todos os testes foram realizados aproximadamente no mesmo horário para cada indivíduo.

### Teste de esforço progressivo

O teste de esforço progressivo foi conduzido em cicloergômetro de resistência mecânica (Cefise Biotec 2100). Antes de cada teste havia um breve aquecimento de cinco minutos de duração com 30 W de resistência, seguido de três minutos de repouso. O teste de esforço progressivo era conduzido com resistência inicial de 30 W e incrementos de carga de 30 W por minuto, até a exaustão voluntária. Os participantes foram instruídos a manter uma cadência constante de 60 rpm, e caso esta não fosse mantida por mais de cinco segundos o teste era interrompido. Havia incentivo verbal por parte dos investigadores.

As trocas gasosas pulmonares foram mensuradas respiração a respiração (Cortex MetaLyzer 3B) durante todos os testes. O equipamento foi calibrado antes de cada teste de acordo com a padronização do fabricante, utilizando-se gases de concentração conhecida de O<sub>2</sub> (16%) e CO<sub>2</sub> (5%) e seringa de volume conhecido. Utilizou-se como critério para determinação do valor de VO<sub>2max</sub> a média dos valores de VO<sub>2</sub> dos 30 s prévios à exaustão.

### Testes retangulares

Cada participante foi submetido a quatro cargas retangulares exaustivas em cicloergômetro com o objetivo de estimar os valores da demanda de O<sub>2</sub> e os parâmetros da cinética do VO<sub>2</sub>. Com exceção da imposição da resistência, todos os procedimentos adotados nos testes retangulares foram idênticos aos do teste de esforço progressivo. As intensidades foram selecionadas empiricamente de modo a precipitar a exaustão dentro de um intervalo compreendido entre 2-12 minutos para cada indivíduo<sup>10</sup>. Não era dada informação aos participantes quanto à intensidade das cargas e duração esperada dos testes. As cargas empregadas tiveram potências compreendidas entre 182,7 ± 33,9 e 279,5 ± 42,5 W. Os testes eram separados por, no mínimo, 24 horas de intervalo, para que o cansaço residual não afetasse o teste seguinte. A ordem de execução dos testes foi aleatória.

A análise da cinética do VO<sub>2</sub> foi realizada a partir das respostas das trocas gasosas pulmonares dos testes de carga constante. Os dados foram mensurados respiração a respiração, interpolados linearmente a cada segundo e alinhados ao tempo de início do exercício. Os 20 s iniciais (referentes ao componente cardiodinâmico) foram excluídos da análise<sup>11</sup>. Procedimentos de regressão não-linear (Marquardt-Levenberg), visando minimizar a soma dos quadrados dos resíduos, foram utilizados para ajustar os dados a funções exponenciais. O modelo matemático utilizado para o ajuste da resposta do VO<sub>2</sub> consistiu de uma função mono-exponencial (equação 1) ou bi-exponencial (equação 2):

$$(1) \quad VO_{2(t)} = VO_{2(b)} + A_1 * (1 - e^{-(t-TD1)/\tau1})$$

$$(2) \quad VO_{2(t)} = VO_{2(b)} + A_1 * (1 - e^{-(t-TD1)/\tau1}) + A_2 * (1 - e^{-(t-TD2)/\tau2}),$$

onde  $A_1$  e  $A_2$  denotam os componentes 'primário' e 'lento'

respectivamente; e VO<sub>2(b)</sub>, A, TD e  $\tau$  as variáveis de linha de base, as assíntotas das amplitudes dos termos exponenciais, tempos de atraso independentes e constantes de tempo. O ganho do componente primário foi calculado para cada intensidade (A<sub>1</sub>/Δpotência).

Hebestreit et al.<sup>12</sup> sugerem que a resposta do VO<sub>2</sub> em intensidades que desencadeiem respostas próximas ou acima do VO<sub>2max</sub> seria descrita pelo modelo exponencial sem a presença do componente lento. Esta propriedade foi verificada mediante comparação dos dois modelos exponenciais, utilizando-se o teste F como critério de escolha<sup>13</sup>.

Além da abordagem exponencial, os dados referentes ao VO<sub>2</sub> também foram analisados mediante aplicação de transformação semi-logarítmica<sup>1-3</sup>. Este segundo modelo requer a estimativa da demanda de O<sub>2</sub> das respectivas potências para o cálculo dos parâmetros da cinética do VO<sub>2</sub>. Entretanto, ao invés de se estimar a demanda de O<sub>2</sub> da maneira habitual (extrapolação da relação individual entre VO<sub>2</sub> e intensidade sub-limiar de lactato), optou-se pela aplicação do método proposto por Hill<sup>9</sup>. Através do emprego de procedimentos de regressão, inserem-se os valores individuais de VO<sub>2</sub> acumulado (consumo total de O<sub>2</sub> durante o exercício, expresso em mL), potência (W) e tempo de exercício (min) dos testes retangulares na equação 3:

$$(3) \quad VO_2 \text{ acumulado} = (\text{demanda de } O_2' * \text{potência} * \text{tempo}) - \text{déficit de } O_2$$

obtendo-se os valores de déficit de O<sub>2</sub> (mL) e demanda de O<sub>2</sub>' (mL.min<sup>-1</sup>.W<sup>-1</sup>). Este parâmetro representa o custo individual de O<sub>2</sub> por watt em intensidades supra-máximas. Deve-se utilizar a demanda de O<sub>2</sub> (mL.min<sup>-1</sup>) específica de cada teste retangular na equação 4:

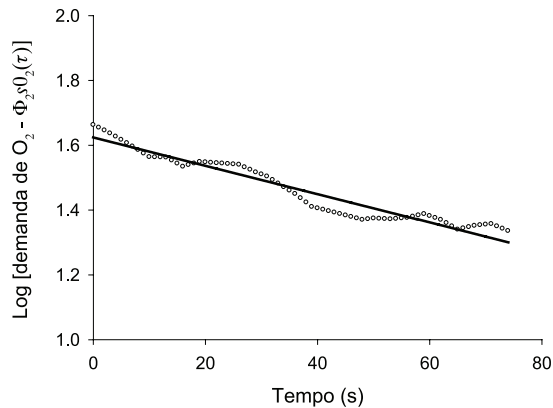
$$(4) \quad \log \Delta VO_{2(t)} = \log_{10} (\text{demanda de } O_2 - \Phi_2 VO_{2(t)})$$

que considera  $\Phi_2 VO_{2(t)}$  como a medida temporal do VO<sub>2</sub> do intervalo compreendido apenas pelo componente primário, estimada previamente na análise exponencial da cinética do VO<sub>2</sub>. A partir dos dados obtidos, calcula-se o valor da inclinação da reta desta relação (figura 2), que será utilizado para a estimativa da constante de tempo pelo modelo semi-logarítmico ( $\tau_{log}$ ) através da equação 5:

$$(5) \quad \tau_{log} = \log_{10}(2) / (\text{inclinação da reta} * 0,693)$$

### Tratamento estatístico

A normalidade da distribuição dos dados foi verificada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. A verificação de eventuais diferenças das respostas das variáveis relacionadas aos testes retangulares, nas diversas intensidades, foi realizada mediante teste de análise de variância para medidas repetidas. Quando os valores de F associados à ANOVA foram estatisticamente significantes, a análise era complementada por meio do teste de Tukey para comparações múltiplas. O nível de significância adotado foi de  $P < 0,05$ . Os resultados são expressos como média ± desvio padrão.



**Figura 2.** Logaritmo da diferença entre a demanda de  $O_2$  e o  $VO_2$  do intervalo compreendido apenas pelo componente primário ( $\Phi_2 VO_{2(t)}$ ) de um sujeito representativo. O valor da inclinação da reta é obtido a partir da aplicação de procedimento de regressão linear entre as variáveis.

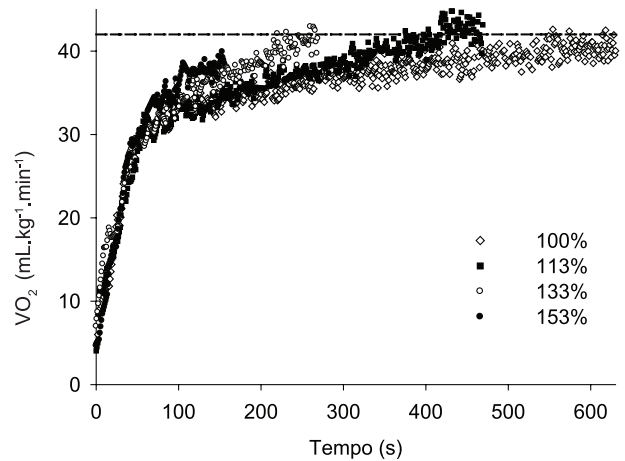
## RESULTADOS

O valor médio de  $VO_{2max}$  atingido no teste de esforço progressivo pela amostra investigada foi de  $3066 \pm 392 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$  ( $40,3 \text{ mL}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ ). As respostas fisiológicas ao término dos testes retangulares são apresentadas na tabela 1. As potências empregadas nos testes retangulares foram de  $182,7 \pm 33,9 \text{ W}$ ,  $207,0 \pm 36,5 \text{ W}$ ,  $242,4 \pm 41,0 \text{ W}$ , e  $279,5 \pm 42,5 \text{ W}$ , correspondendo respectivamente a 100, 113, 133 e 153% do  $VO_{2max}$ . Os valores de demanda de  $O_2$  aumentaram com a elevação da intensidade ( $P < 0,001$ ). Entretanto, o valor de  $VO_2$  final (EEVO<sub>2</sub>) não seguiu o mesmo comportamento, sendo diferente da demanda de  $O_2$  nas intensidades de 113, 133 e 153%  $VO_{2max}$  ( $P < 0,001$ ). Isto pode ser confirmado pelo percentual do  $VO_{2max}$  atingido ao final dos testes retangulares.

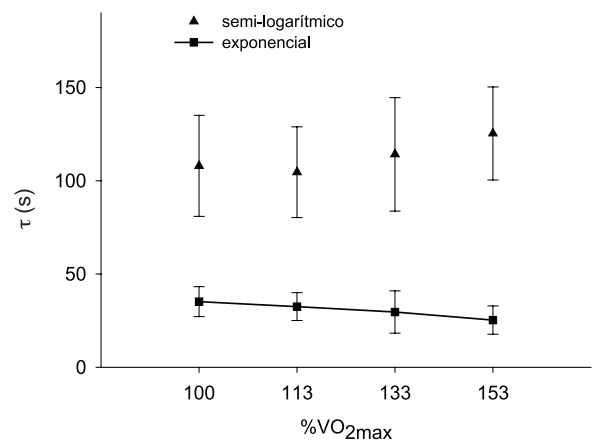
A figura 3 ilustra o comportamento do  $VO_2$  em função do tempo nas diferentes intensidades dos testes retangulares de um sujeito representativo. Segundo o teste F<sup>13</sup>, o modelo bi-exponencial (equação 2) demonstrou ajuste adequado aos dados referentes aos testes retangulares das intensidades de 100, 113 e 133% do  $VO_{2max}$ , enquanto o modelo mono-exponencial (equação 1) descreveu apropriadamente os dados da intensidade de 153% do  $VO_{2max}$ .

Os valores médios das respostas dos parâmetros da cinética do  $VO_2$  nas quatro intensidades são apresentados na tabela 2. Não houve diferença estatisticamente significativa entre os valores de  $VO_2$  (b). A amplitude do componente primário ( $A_1$ ) aumentou na intensidade de 153% do  $VO_{2max}$  ( $P < 0,05$ ) e, apesar de não ter sido encontrada diferença na  $A_1$  entre 113 e 133% do  $VO_{2max}$ , foi observada diminuição nos ganhos do componente primário nas duas mais altas intensidades ( $P < 0,002$ ). Os valores da constante de tempo do componente primário estimados pelo modelo exponencial ( $\tau_1$ ) foram menores em todas as intensidades em relação ao modelo semi-logarítmico ( $\tau_{log}$ ) ( $P < 0,001$ ). Entretanto, não foram observadas diferenças nas estimativas de  $\tau_1$  e  $\tau_{log}$  em função

da intensidade dos testes retangulares. O efeito da aplicação dos modelos exponencial e semi-logarítmico sobre a estimativa do  $\tau$  do componente primário em exercícios supra-máximos pode ser observado na figura 4.



**Figura 3.** Comportamento do  $VO_2$  em função do tempo nas diferentes intensidades dos testes retangulares de um sujeito representativo. O valor do  $VO_{2max}$  é representado pela linha tracejada.



**Figura 4.** Valores médios associados as constantes de tempo dos modelos exponencial ( $\tau_1$ ) e semi-logarítmico ( $\tau_{log}$ ) nas diferentes intensidades dos testes retangulares. Há diferença significativa entre todos os valores de  $\tau_1$  e  $\tau_{log}$  nas mesmas intensidades.

## DISCUSSÃO

No presente estudo, as respostas da cinética do  $VO_2$  em exercício supra-máximo foram caracterizadas por meio de diferentes modelos matemáticos. A ênfase da análise foi dada ao componente primário, pelo fato deste refletir o metabolismo oxidativo muscular<sup>4</sup> e estar sujeito à limitação/controlado pelo sistema cardiorrespiratório. Investigações prévias verificaram o efeito do modelo semi-logarítmico sobre o  $\tau$  do componente primário nestas intensidades<sup>1,2</sup>. Contudo, o emprego de técnicas que violam pressupostos fisiológicos pode inviabilizar a estimativa dos

**Tabela 1.** Valores médios  $\pm$  desvio-padrão das respostas metabólicas referentes as diferentes intensidades dos testes retangulares.

	100% VO <sub>2max</sub>	113% VO <sub>2max</sub>	133% VO <sub>2max</sub>	153% VO <sub>2max</sub>
potência (W)	182,7 $\pm 33,9^a$	207,0 $\pm 36,5^a$	242,5 $\pm 41,0^a$	279,5 $\pm 42,5^a$
tlim (s)	670,2 $\pm 119,4^a$	420,3 $\pm 68,6^a$	258,0 $\pm 28,8^a$	150,6 $\pm 25,8^a$
demanda de O <sub>2</sub> (mL.min <sup>-1</sup> )	3076,2 $\pm 456,6^a$	3484,1 $\pm 456,0^a$	4079,1 $\pm 481,8^a$	4711,7 $\pm 549,0^a$
EEVO <sub>2</sub> (mL.min <sup>-1</sup> )	2867,9 $\pm 490,2$	3064,2 $\pm 518,6^b$	3091,9 $\pm 532,4^b$	2983,0 $\pm 429,1^b$
%VO <sub>2max</sub> atingido	95,7 $\pm 5,5$	102,2 $\pm 11,8$	101,9 $\pm 10,3$	98,2 $\pm 5,9$

tlim (tempo até a exaustão), EEVO<sub>2</sub> (valor de VO<sub>2</sub> final).

<sup>a</sup> - diferença estatisticamente significativa entre todas as intensidades

<sup>b</sup> - diferença estatisticamente significativa em comparação à demanda de O<sub>2</sub> na mesma intensidade

**Tabela 2.** Valores médios  $\pm$  desvio-padrão das respostas dos parâmetros da cinética do VO<sub>2</sub> referentes as diferentes intensidades dos testes retangulares.

	100% VO <sub>2max</sub>	113% VO <sub>2max</sub>	133% VO <sub>2max</sub>	153% VO <sub>2max</sub>
VO <sub>2(b)</sub> (mL.min <sup>-1</sup> )	592,5 $\pm 143,7$	530,8 $\pm 187,5$	623,2 $\pm 233,7$	465,0 $\pm 219,2$
TD <sub>1</sub> (s)	6,5 $\pm 6,7$	6,6 $\pm 5,8$	4,1 $\pm 5,5$	5,1 $\pm 4,8$
A <sub>1</sub> (mL.min <sup>-1</sup> )	1793,0 $\pm 296,8^{a,b}$	2076,0 $\pm 483,1^b$	2122,6 $\pm 477,6^b$	2409,7 $\pm 540,3$
$\tau_1$ (s)	35,1 $\pm 8,0$	32,5 $\pm 7,4$	29,6 $\pm 11,3$	25,3 $\pm 7,5$
$\tau_{log}$ (s)	107,9 $\pm 27,1^c$	104,5 $\pm 24,3^c$	114,1 $\pm 30,4^c$	125,3 $\pm 24,9^c$
TD <sub>2</sub> (s)	154,7 $\pm 52,3$	123,4 $\pm 40,6$	116,6 $\pm 30,5$	-
A <sub>2</sub> (mL.min <sup>-1</sup> )	659,2 $\pm 392,2$	721,3 $\pm 210,1$	376,6 $\pm 310,0$	-
$\tau_2$ (s)	194,4 $\pm 49,5^a$	220,8 $\pm 94,4^a$	65,1 $\pm 59,3$	-
ganho (mL.min <sup>-1</sup> .W <sup>-1</sup> )	9,9 $\pm 1,1^{a,b}$	9,9 $\pm 1,0^{a,b}$	8,7 $\pm 1,2$	8,5 $\pm 1,2$

<sup>a</sup> - diferença estatisticamente significativa em comparação à 133%VO<sub>2max</sub>

<sup>b</sup> - diferença estatisticamente significativa em comparação à 153%VO<sub>2max</sub>

<sup>c</sup> - diferença estatisticamente significativa entre  $\tau_1$  na mesma intensidade

parâmetros. Segundo Zoladz et al.<sup>5</sup>, a extrapolação da relação sub-limiar de lactato entre VO<sub>2</sub> e intensidade resulta em redução aproximada de 15% dos valores estimados da demanda de O<sub>2</sub>, o que pode levar a sérias alterações na magnitude do “sinal de erro” e conseqüentemente à alteração do  $\tau$ . Portanto, a análise semi-logarítmica baseada na predição da demanda de O<sub>2</sub> de Hill<sup>9</sup> forneceria invariavelmente maiores valores de  $\tau_{log}$  em comparação ao ajuste semi-logarítmico que utilizasse a extrapolação da relação VO<sub>2</sub> e intensidade, conforme utilizado anteriormente por Hughson et al.<sup>1</sup> e Carter et al.<sup>2</sup>. De fato, este comportamento foi observado, porém a grande disparidade em relação aos valores de  $\tau_{log}$  reportados previamente<sup>1,2</sup> alertam acerca da aplicação dos modelos matemáticos tradicionais na caracterização das respostas do VO<sub>2</sub> em intensidades supra-máximas. Os valores de  $\tau_{log}$  obtidos por esta nova abordagem atingiram cerca de duas vezes os valores reportados por estudos anteriores<sup>1,2</sup>. Estes achados possuem profundo impacto sobre a discussão dos mecanismos de regulação do sistema cardiorrespiratório, evidenciando maior lentidão na regulação e sugerindo maior participação de fatores limitantes na cinética do VO<sub>2</sub>. A lentidão no ajuste das

respostas da cinética do VO<sub>2</sub> está obrigatoriamente associada à maior contribuição do metabolismo anaeróbio para a realização de trabalho supra-máximo, resultando na maior dependência dos estoques de fosfocreatina e da glicólise anaeróbia. A limitação da cinética do VO<sub>2</sub> nestas intensidades parece advir tanto do insuficiente suprimento de O<sub>2</sub> para a musculatura ativa quanto da inércia do metabolismo oxidativo<sup>14</sup>. Assim, a descrição apropriada da cinética do VO<sub>2</sub> revela que a importância destes fatores assumiria proporções ainda maiores do que anteriormente se acreditava em intensidades supra-máximas, tendo grande implicação sobre a tolerância ao exercício e à fadiga muscular.

Em relação ao modelo exponencial, foram encontradas diferenças entre  $\tau_{log}$  (107,9  $\pm$  27,1s; 104,5  $\pm$  24,3s; 114,1  $\pm$  30,4s; 125,3  $\pm$  24,9s) e  $\tau_1$  (35,1  $\pm$  8,0s; 32,5  $\pm$  7,4s; 29,6  $\pm$  11,3s; 25,3  $\pm$  7,5s) em todas as intensidades. Carter et al.<sup>2</sup> sugerem que os menores valores de  $\tau_1$  estimados nestas intensidades poderiam advir da pequena quantidade de dados disponíveis para o ajuste matemático. Porém, esta suposição parece equivocada após a constatação de que parâmetros estimados a partir da aplicação do modelo exponencial em toda a série de dados não

diferem daqueles estimados quando se restringe a análise aos primeiros 45 segundos de exercício<sup>15</sup>. Os diferentes resultados entre os modelos são oriundos da influência da magnitude do “sinal de erro” no cálculo do  $\tau_1$ , como pode ser observado na figura 1. A restrição da magnitude do “sinal de erro” pelo  $VO_{2max}$  se torna evidente após a observação da manutenção dos valores de  $EEVO_2$ , enquanto a demanda de  $O_2$  aumenta nas intensidades correspondentes a 113, 133 e 153% do  $VO_{2max}$  (tabela 1).

Considerando a inexistência de consenso na literatura a respeito da descrição apropriada da cinética do  $VO_2$  em intensidades supra-máximas<sup>16</sup>, o que resulta na aplicação de diferentes modelos exponenciais, entende-se porque os estudos encontram grandes variações na estimativa de  $\tau_1$ <sup>1,2,10,12,15,17,18</sup>. Assim, isto pode ter levado à obtenção de valores de  $\tau_1$  ligeiramente maiores em relação aos estudos citados. Alternativamente, uma potencial causa seja a menor aptidão cardiorrespiratória de nossa amostra, evidenciada pelo valor relativamente baixo de  $VO_{2max}$ . Os resultados de Scheuermann e Barstow<sup>18</sup> suportam esta hipótese, mostrando correlação negativa entre  $\tau_1$  e  $VO_{2max}$  ( $r = 0,66$ ,  $P < 0,05$ ) e  $\tau_1$  e a atividade da enzima citrato sintase ( $r = 0,53$ ,  $P < 0,05$ ) para intensidades próximas e superiores ao  $VO_{2max}$ .

Corroborando outros resultados<sup>1,2,10,15,18</sup>, a constatação de que  $\tau_1$  e  $\tau_{log}$  permanecem invariáveis ao longo das intensidades supra-máximas suporta a hipótese de que o sistema se comportaria de forma linear<sup>19</sup>, indicando que a cinética do  $VO_2$  seria determinada pelo(s) mesmo(s) mecanismo(s) fisiológico(s) nestas condições de intensidade. Contudo, a redução do ganho do componente primário (tabela 1), fato também encontrado em investigações prévias<sup>2,15,18</sup>, indica o contrário. Assim, a cinética do  $VO_2$  se tornaria mais complexa com o aumento da intensidade do exercício supra-máximo, sugerindo o desenvolvimento adicional de fator(es) de limitação. As causas relacionadas à diminuição do ganho do componente primário nestas intensidades permanecem obscuras. Wilkerson et al.<sup>15</sup> sugerem que a maior contribuição das fibras musculares do tipo II na produção de força, estaria envolvida neste fenômeno, embora Scheuermann e Barstow<sup>18</sup> questionem sua possível participação.

A importância da utilização de modelos matemáticos baseia-se na atribuição de significados fisiológicos aos parâmetros das equações<sup>19</sup>. Segundo critério de Swanson et al.<sup>20</sup>, o modelo exponencial descreveria a cinética do  $VO_2$  em intensidades supra-máximas com caráter predominantemente empírico, uma vez que o “sinal de erro” e conseqüentemente o  $\tau$  do componente fundamental não teriam equivalente fisiológico justificável<sup>1,3</sup>. Outro exemplo de aplicação de modelo empírico pode ser observado no estudo de Bakker et al.<sup>21</sup>, que caracterizaram a resposta da cinética do  $VO_2$  em exercício senoidal. O modelo necessitava de tempo de atraso negativo para ajustar apropriadamente os dados, o que representa uma violação da relação causa-efeito e, conseqüentemente,

inviabiliza a realização de interpretações fisiológicas. Por outro lado, a utilização do método de Hill<sup>9</sup> para a estimativa da demanda de  $O_2$  e seu posterior emprego no cálculo dos parâmetros da cinética do  $VO_2$  em exercícios supra-máximos, através de ajuste semi-logarítmico, forneceria parâmetros como significado fisiológico válido, classificando este modelo como funcional<sup>20</sup>. Portanto, a discussão acerca de mecanismos fisiológicos envolvidos na cinética do  $VO_2$  em exercícios supra-máximos só poderia ser realizada sobre resultados oriundos de modelos funcionais.

Uma potencial limitação deste estudo foi a realização de apenas uma transição de exercício para cada intensidade dos testes retangulares, o que pode ter diminuído a confiabilidade na estimativa dos parâmetros da cinética do  $VO_2$ <sup>22</sup>. Entretanto, o ajuste aplicado parece ser satisfatório, pois em todos os testes do presente estudo o número de dados excedeu o valor mínimo necessário para uma estimativa acurada dos parâmetros<sup>23</sup>.

## CONCLUSÃO

Os resultados do presente estudo demonstram comportamento conflitante da cinética do  $VO_2$  em exercícios supra-máximos a partir da aplicação de modelos matemáticos distintos. O modelo semi-logarítmico combinado ao método de estimativa da demanda de  $O_2$  de Hill<sup>9</sup> forneceu maiores valores de  $\tau_{log}$  em comparação com o modelo exponencial ( $\tau_1$ ), sugerindo que a regulação do sistema cardiorrespiratório nestas intensidades possa ser mais lenta do que se acreditava anteriormente. Dessa forma, a disparidade encontrada em relação aos modelos matemáticos aplicados sugere precaução na realização de inferências fisiológicas dos parâmetros da cinética do  $VO_2$  obtidos em exercícios supra-máximos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. 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;88:1812-1819.
2. Carter H, Pringle JSM, Barstow TJ, Doust JH. Oxygen uptake kinetics during supra  $VO_{2max}$  treadmill running in humans. *Int J Sports Med* 2006;27:149-157.
3. Margaria R, Mangili F, Cuttica F, Cerretelli P. The kinetics of the oxygen consumption at the onset of muscular exercise in man. *Ergonomics* 1965;8:49-54.
4. Gaesser GA, Poole DC. The slow component of oxygen uptake kinetics in humans. *Exerc Sport Sci Rev* 1996;24:35-7.
5. Zoladz JA, Rademaker ACHJ, Sargeant AJ. Non-linear relationship between  $O_2$  uptake and power output at high intensities of exercise in humans. *J Physiol* 1995;488(1):211-217.
6. Bangsbo J. Oxygen deficit: a measure of the anaerobic energy production during intense exercise? *Can J Appl Physiol* 1996;21(5):350-363.
7. Medbø JI, Mohn A, Tabata I, Bahr R, Vaage O, Sejersted OM. Anaerobic capacity determined by maximal accumulated  $O_2$  deficit. *J Appl Physiol* 1988;64(1):50-60.

8. Nakamura FY, Franchini E. Máximo déficit acumulado de oxigênio como preditor de capacidade anaeróbia. *Rev Bras Cineantropom Desempenho Hum* 2006;8(1):88-95.
9. Hill DW. Determination of accumulated O<sub>2</sub> deficit in exhaustive short-duration exercise. *Can J Appl Physiol* 1996;21(1):63-74.
10. Hill DW, Stevens EC. VO<sub>2</sub> response profiles in severe intensity exercise. *J Sports Med Phys Fitness* 2005;45:239-247.
11. Whipp BJ, Ward SA, Lamarra N, Davis JA, Wasserman K. Parameters of ventilatory and gas exchange dynamics during exercise. *J Appl Physiol* 1982;52(6):1506-1523.
12. Hebestreit H, Kriemler S, Hughson RL, Bar-or A. Kinetics of oxygen uptake at the onset of exercise in boys and men. *J Appl Physiol* 1998;85(5):1833-1841.
13. Motulsky HJ, Ransnas LA. Fitting curves to data using nonlinear regression: a practical and nonmathematical review. *Faseb J* 1987;1:365-374.
14. Grassi B, Hogan MC, Kelley KM, Aschenbach WG, Hamann JJ, Evans RK, et al. Role of convective O<sub>2</sub> delivery in determining VO<sub>2</sub> on-kinetics in canine muscle contracting at peak VO<sub>2</sub>. *J Appl Physiol* 2000;89:1293-1301.
15. Wilkerson DP, Koppo K, Barstow TJ, Jones AM. Effect of work rate on the functional 'gain' of Phase II pulmonary O<sub>2</sub> uptake response to exercise. *Respir Physiol Neurobiol* 2004;142:211-223.
16. Whipp, BJ. The slow component of O<sub>2</sub> uptake kinetics during heavy exercise. *Med Sci Sports Exerc* 1994;26(11):1319-1326.
17. Özyener F, Rossiter HB, Ward SA, Whipp BJ. Influence of exercise intensity on the on- and off- transient kinetics of pulmonary oxygen uptake in humans. *J Physiol* 2001;533(3):891-902.
18. Scheuermann BW, Barstow TJ. O<sub>2</sub> uptake kinetics during exercise at peak O<sub>2</sub> uptake. *J Appl Physiol* 2003;95:2014-2022.
19. Lamarra N. Variables, constants, and parameters: clarifying the system structure. *Med Sci Sports Exerc* 1990;22(1):88-95.
20. Swanson GD, Sherrill DL, Engeman RM. Model utility in the study of cardiorespiratory control. *Ann Biomed Eng* 1983;11:337-348.
21. Bakker HK, Struikenkamp RS, De Vries GA. Dynamics of ventilation, heart rate, and gas exchange: sinusoidal and impulse work loads in man. *J Appl Physiol* 1980;48(2):289-301.
22. Lamarra N, Whipp BJ, Ward SA, Wasserman K. Effect of interbreath fluctuations on characterizing exercise gas exchange kinetics. *J Appl Physiol* 1987;62(5):2003-2012.
23. Borrani F, Candau R, Millet GY, Perrey S, Fuchslocher J, Rouillon JD. Is the VO<sub>2</sub> slow component dependent on progressive recruitment of fast-twitch fibers in trained runners? *J Appl Physiol* 2001;90:2212-2220.

---

#### Endereço para correspondência

Daniel Müller Hirai  
Grupo de Estudo das Adaptações Fisiológicas ao Treinamento (GEAFIT)  
Centro de Educação Física e Desportos - Universidade Estadual de Londrina  
Rod. Celso Garcia Cid, km 380, Campus Universitário  
CEP 86051-990 - Londrina, PR - Brasil  
E-mail: d.hirai@yahoo.com

Recebido em 08/03/07  
Revisado em 26/05/07  
Aprovado em 30/05/07