

**Artigo original**

Daniel Müller Hirai¹
Nilo Massaru Okuno¹
Luiz Augusto Buoro Perandini¹
Guilherme Morais Puga²
Herbert Gustavo Simões²
Fábio Yuzo Nakamura¹

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.

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

INTRODUÇÃO

A compreensão das respostas da cinética do consumo de oxigênio (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 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 VO_2 (no estado estável) necessário para a manutenção da taxa metabólica fixada pelo exercício¹. Portanto, o cálculo da constante de tempo (τ), que representa o tempo necessário para atingir 63% da resposta total, sofre influência direta da estimativa do “sinal de erro”.

Tradicionalmente, a cinética do 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 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 τ ^{1,2}. Em outras palavras, o ajuste cinético do VO_2 aparenta ser muito rápido. Portanto, a aplicação do modelo exponencial em intensidades supra-máximas provavelmente estima parâmetros incorretos da cinética do VO_2 , porque não assume como assíntota o valor do verdadeiro “sinal de erro” metabólico¹.

Em contrapartida, a utilização do modelo semi-logarítmico^{1,2,3} 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 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 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 O_2 supra-máxima é realizada mediante a extrapolação da porção sub-limiar de lactato da relação entre VO_2 e intensidade de exercício. Entretanto, este procedimento não é apropriado porque assume linearidade entre VO_2 e intensidade, negligenciando a existência do componente lento da cinética do VO_2 ^{4,5} e resultando em valores subestimados da demanda de O_2 . Apesar de severas críticas a este procedimento⁶, ele é comumente utilizado na estimativa do máximo déficit acumulado de oxigênio (MAOD)^{7,8}, exigindo múltiplas sessões de exercício submáximo para estabelecimento da relação VO_2 versus intensidade. Uma possível alternativa para a predição da demanda de O_2 seria o emprego do método de Hill⁹, na qual não existe a necessidade de assumir linearidade entre VO_2 e intensidade. Neste método, a

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

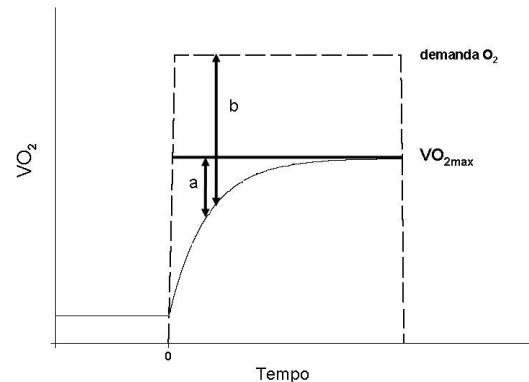


Figura 1. Representação esquemática do comportamento do “sinal de erro” metabólico em exercício retangular supra-máximo segundo diferentes modelos matemáticos. A linha horizontal contínua representa o valor do $\text{VO}_{2\text{max}}$, a linha horizontal tracejada a demanda de O_2 supra-máxima, ($t=0$) 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 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 O_2 supra-máxima foi estimada pelo método de Hill⁹, 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 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 O₂ (16%) e CO₂ (5%) e seringa de volume conhecido. Utilizou-se como critério para determinação do valor de VO_{2max} a média dos valores de VO₂ 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 O₂ e os parâmetros da cinética do VO₂. 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 indivíduo¹⁰. 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 VO₂ 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 análise¹¹. 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 VO₂ 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_{2(b)}, A, TD e τ 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_1/Δ potência).

Hebestreit et al.¹² sugerem que a resposta do VO₂ em intensidades que desencadeiem respostas próximas ou acima do VO_{2max} 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 escolha¹³.

Além da abordagem exponencial, os dados referentes ao VO₂ também foram analisados mediante aplicação de transformação semi-logarítmica¹⁻³. Este segundo modelo requer a estimativa da demanda de O₂ das respectivas potências para o cálculo dos parâmetros da cinética do VO₂. Entretanto, ao invés de se estimar a demanda de O₂ da maneira habitual (extrapolação da relação individual entre VO₂ e intensidade sub-limiar de lactato), optou-se pela aplicação do método proposto por Hill⁹. Através do emprego de procedimentos de regressão, inserem-se os valores individuais de VO₂ acumulado (consumo total de O₂ 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 O₂ (mL) e demanda de O₂' (mL.min⁻¹.W⁻¹). Este parâmetro representa o custo individual de O₂ por watt em intensidades supra-máximas. Deve-se utilizar a demanda de O₂ (mL.min⁻¹) 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 VO₂ do intervalo compreendido apenas pelo componente primário, estimada previamente na análise exponencial da cinética do VO₂. 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 (τ_{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.

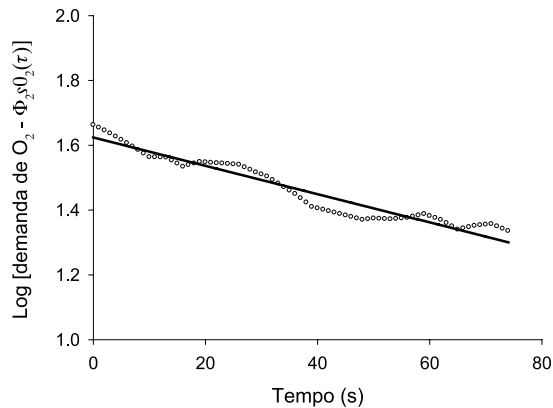


Figura 2. Logaritmo da diferença entre a demanda de O_2 e o VO_2 do intervalo compreendido apenas pelo componente primário ($\Phi_2 VO_{2(t)}$) de um sujeito representativo. O valor da inclinação da reta é obtido a partir da aplicação de procedimento de regressão linear entre as variáveis.

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 (EEVO₂) 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 F¹³, 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 (τ_1) foram menores em todas as intensidades em relação ao modelo semi-logarítmico (τ_{log}) ($P < 0,001$). Entretanto, não foram observadas diferenças nas estimativas de τ_1 e τ_{log} em função

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

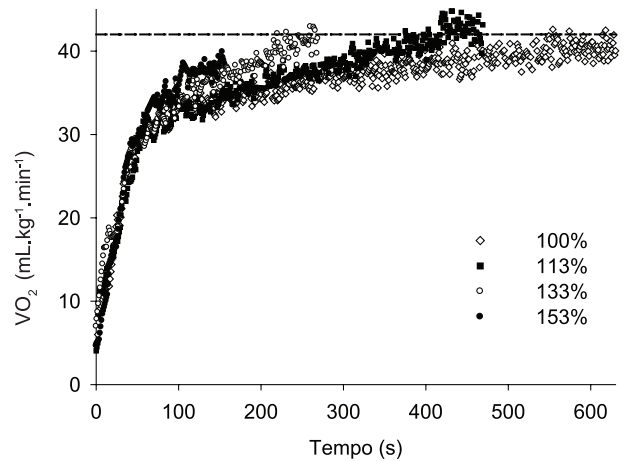


Figura 3. Comportamento do VO_2 em função do tempo nas diferentes intensidades dos testes retangulares de um sujeito representativo. O valor do VO_{2max} é representado pela linha tracejada.

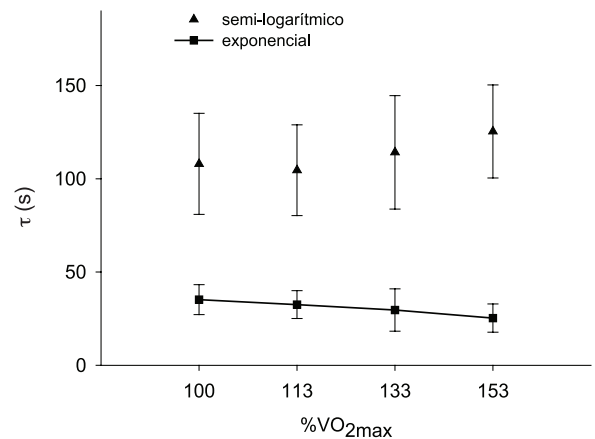


Figura 4. Valores médios associados as constantes de tempo dos modelos exponencial (τ_1) e semi-logarítmico (τ_{log}) nas diferentes intensidades dos testes retangulares. Há diferença significativa entre todos os valores de τ_1 e τ_{log} nas mesmas intensidades.

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 muscular⁴ e estar sujeito à limitação/controlado pelo sistema cardiorrespiratório. Investigações prévias verificaram o efeito do modelo semi-logarítmico sobre o τ do componente primário nestas intensidades^{1,2}. 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 _{2max}	113% VO _{2max}	133% VO _{2max}	153% VO _{2max}
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 ₂ (mL.min ⁻¹)	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 ₂ (mL.min ⁻¹)	2867,9 $\pm 490,2$	3064,2 $\pm 518,6^b$	3091,9 $\pm 532,4^b$	2983,0 $\pm 429,1^b$
%VO _{2max} 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), EEVO₂ (valor de VO₂ final).

^a - diferença estatisticamente significativa entre todas as intensidades

^b - diferença estatisticamente significativa em comparação à demanda de O₂ na mesma intensidade

Tabela 2. Valores médios \pm desvio-padrão das respostas dos parâmetros da cinética do VO₂ referentes as diferentes intensidades dos testes retangulares.

	100% VO _{2max}	113% VO _{2max}	133% VO _{2max}	153% VO _{2max}
VO _{2(b)} (mL.min ⁻¹)	592,5 $\pm 143,7$	530,8 $\pm 187,5$	623,2 $\pm 233,7$	465,0 $\pm 219,2$
TD ₁ (s)	6,5 $\pm 6,7$	6,6 $\pm 5,8$	4,1 $\pm 5,5$	5,1 $\pm 4,8$
A ₁ (mL.min ⁻¹)	1793,0 $\pm 296,8^{a,b}$	2076,0 $\pm 483,1^b$	2122,6 $\pm 477,6^b$	2409,7 $\pm 540,3$
τ_1 (s)	35,1 $\pm 8,0$	32,5 $\pm 7,4$	29,6 $\pm 11,3$	25,3 $\pm 7,5$
τ_{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 ₂ (s)	154,7 $\pm 52,3$	123,4 $\pm 40,6$	116,6 $\pm 30,5$	-
A ₂ (mL.min ⁻¹)	659,2 $\pm 392,2$	721,3 $\pm 210,1$	376,6 $\pm 310,0$	-
τ_2 (s)	194,4 $\pm 49,5^a$	220,8 $\pm 94,4^a$	65,1 $\pm 59,3$	-
ganho (mL.min ⁻¹ .W ⁻¹)	9,9 $\pm 1,1^{a,b}$	9,9 $\pm 1,0^{a,b}$	8,7 $\pm 1,2$	8,5 $\pm 1,2$

^a - diferença estatisticamente significativa em comparação à 133%VO_{2max}

^b - diferença estatisticamente significativa em comparação à 153%VO_{2max}

^c - diferença estatisticamente significativa entre τ_1 na mesma intensidade

parâmetros. Segundo Zoladz et al.⁵, a extrapolação da relação sub-limiar de lactato entre VO₂ e intensidade resulta em redução aproximada de 15% dos valores estimados da demanda de O₂, o que pode levar a sérias alterações na magnitude do “sinal de erro” e conseqüentemente à alteração do τ . Portanto, a análise semi-logarítmica baseada na predição da demanda de O₂ de Hill⁹ forneceria invariavelmente maiores valores de τ_{log} em comparação ao ajuste semi-logarítmico que utilizasse a extrapolação da relação VO₂ e intensidade, conforme utilizado anteriormente por Hughson et al.¹ e Carter et al.². De fato, este comportamento foi observado, porém a grande disparidade em relação aos valores de τ_{log} reportados previamente^{1,2} alertam acerca da aplicação dos modelos matemáticos tradicionais na caracterização das respostas do VO₂ em intensidades supra-máximas. Os valores de τ_{log} obtidos por esta nova abordagem atingiram cerca de duas vezes os valores reportados por estudos anteriores^{1,2}. 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 VO₂. A lentidão no ajuste das

respostas da cinética do VO₂ 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 VO₂ nestas intensidades parece advir tanto do insuficiente suprimento de O₂ para a musculatura ativa quanto da inércia do metabolismo oxidativo¹⁴. Assim, a descrição apropriada da cinética do VO₂ 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 τ_{log} (107,9 \pm 27,1s; 104,5 \pm 24,3s; 114,1 \pm 30,4s; 125,3 \pm 24,9s) e τ_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.² sugerem que os menores valores de τ_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 exercício¹⁵. Os diferentes resultados entre os modelos são oriundos da influência da magnitude do “sinal de erro” no cálculo do τ_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-máximas¹⁶, o que resulta na aplicação de diferentes modelos exponenciais, entende-se porque os estudos encontram grandes variações na estimativa de τ_1 ^{1,2,10,12,15,17,18}. Assim, isto pode ter levado à obtenção de valores de τ_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 Barstow¹⁸ suportam esta hipótese, mostrando correlação negativa entre τ_1 e VO_{2max} ($r = 0,66$, $P < 0,05$) e τ_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^{1,2,10,15,18}, a constatação de que τ_1 e τ_{log} permanecem invariáveis ao longo das intensidades supra-máximas suporta a hipótese de que o sistema se comportaria de forma linear¹⁹, 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^{2,15,18}, 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.¹⁵ sugerem que a maior contribuição das fibras musculares do tipo II na produção de força, estaria envolvida neste fenômeno, embora Scheuermann e Barstow¹⁸ questionem sua possível participação.

A importância da utilização de modelos matemáticos baseia-se na atribuição de significados fisiológicos aos parâmetros das equações¹⁹. Segundo critério de Swanson et al.²⁰, 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 τ do componente fundamental não teriam equivalente fisiológico justificável^{1,3}. Outro exemplo de aplicação de modelo empírico pode ser observado no estudo de Bakker et al.²¹, 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 Hill⁹ 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 funcional²⁰. 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 ²². 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 parâmetros²³.

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 Hill⁹ forneceu maiores valores de τ_{log} em comparação com o modelo exponencial (τ_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 O₂ deficit in exhaustive short-duration exercise. *Can J Appl Physiol* 1996;21(1):63-74.
10. Hill DW, Stevens EC. VO₂ 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 O₂ delivery in determining VO₂ on-kinetics in canine muscle contracting at peak VO₂. *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 O₂ uptake response to exercise. *Respir Physiol Neurobiol* 2004;142:211-223.
16. Whipp, BJ. The slow component of O₂ 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. O₂ uptake kinetics during exercise at peak O₂ 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 VO₂ 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