

Componente lento da cinética do VO_2 : determinantes fisiológicos e implicações para o desempenho em exercícios aeróbios

Slow component of VO_2 kinetics: physiological determinants and implications for performance in aerobic exercises

Renato Aparecido Corrêa Caritá¹
Dalton Müller Pessoa Filho^{1,2}
Luis Fabiano Barbosa¹
Camila Coelho Greco¹

Resumo – A cinética do consumo de oxigênio (VO_2) e a resposta do lactato sanguíneo durante o exercício de carga constante em diferentes intensidades permitem caracterizar os domínios moderado, pesado e severo do exercício. Em exercício de intensidade constante, o perfil da resposta do VO_2 , analisada por ajustes exponenciais, apresenta as fases cardiodinâmica, fundamental e lenta. A ocorrência do componente lento (CL) tem sido associada a fatores como recrutamento de fibras do tipo II e acúmulo de metabólitos, como lactato, íons H^+ , fosfato inorgânico e ADP. O CL expressa uma redução da eficiência muscular e tem sido associado à menor tolerância de exercícios aeróbios de intensidade alta. O presente estudo teve por objetivo detalhar a fundamentação teórica sobre sua ocorrência, a influência na tolerância ao exercício, bem como prover os diferentes procedimentos adotados em sua quantificação.

Palavras-chave: Consumo de oxigênio; Desempenho esportivo; Exercício; Modelos matemáticos.

Abstract – Oxygen uptake (VO_2) kinetics and blood lactate response during constant workload exercise at different intensities allow characterizing the moderate, heavy and severe exercise domains. In constant-intensity exercise, the VO_2 response profile, analyzed by exponential fits, shows the cardiodynamic, fundamental and slow phases. The occurrence of the slow component (SC) has been associated with factors such as the recruitment of type II fibers and the accumulation of metabolites such as lactate, ions H^+ , inorganic phosphate and adenosine diphosphate. The SC expresses a reduction of muscular efficiency and has been associated with lower tolerance to high-intensity aerobic exercise. The present study aimed to detail the theoretical framework of its occurrence and its influence on exercise tolerance, as well as providing the different procedures used in its quantification.

Key words: Exercise; Mathematical models; Oxygen uptake; Sports performance.

1 Universidade Estadual Paulista,
Laboratório de Avaliação da Per-
formance Humana, IB, Rio Claro,
SP, Brasil.

2 Universidade Estadual Paulista,
Departamento de Educação Física,
FC, Bauru, SP, Brasil

Recebido em 11/01/13
Revisado em 28/08/13
Aprovado em 17/09/13



Licença
Creative Commons

INTRODUÇÃO

A análise da resposta da concentração de lactato sanguíneo ([La]) e do consumo de oxigênio (VO_2) permite caracterizar diferentes domínios de intensidade de exercício¹⁻³. O componente lento (CL) é característico dos domínios pesado e severo do exercício^{4,5}, e tem sido analisado na corrida⁶, ciclismo⁷, e natação⁸. Basicamente, o CL é caracterizado por uma resposta exponencial do VO_2 sobreposta à resposta primária, com amplitude que pode variar entre 250 e 600 $\text{mLO}_2 \cdot \text{min}^{-1}$, aproximadamente, sendo sua quantificação realizada de forma pontual (início pré-definido), ou por meio de modelagem matemática (em esforços limitados a 6 - 10 minutos de exercício). No ciclismo, por exemplo, em intensidades de exercício nas quais há o CL, o custo da atividade tende a ser maior do que 9-11 $\text{mLO}_2 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$, que é característico do domínio moderado⁴. O início do CL ocorre por volta de 100 e 180 segundos após o início do exercício^{5,6,9,10}. Estas variações ocorrem por fatores como o tipo de exercício e o nível de treinamento^{11,12}. Entre os mecanismos fisiológicos que são sugeridos para explicar este custo adicional do VO_2 , apesar de algumas controvérsias e informações não conclusivas, estão o acúmulo de metabólitos e de catecolaminas, o trabalho dos músculos ventilatórios e cardíaco, a elevação da temperatura corporal, a ativação de músculos acessórios e o recrutamento de fibras do tipo II, que são menos eficientes^{4,13}.

Tem sido sugerido na literatura que o CL representa uma redução da eficiência muscular e que pode estar associado com a tolerância ao exercício⁸. Portanto, a análise dos principais fatores que podem estar associados ao CL, como também as implicações do CL para a prática do exercício físico podem auxiliar na prescrição do treinamento aeróbio em indivíduos sedentários, ativos e treinados^{11,14-17}, tanto para a melhora da performance quanto para a melhora do estado de saúde e qualidade de vida.

Desta forma, o objetivo do presente estudo foi analisar os mecanismos do CL, como também os procedimentos de determinação do CL, e os valores obtidos em diferentes condições de tipo de exercício, estado de treinamento, idade e gênero. Ao explorar os conceitos e técnicas de análise do controle da cinética do VO_2 , espera-se fornecer subsídios sobre a compreensão dos mecanismos fisiológicos que influenciam sua resposta, como também as implicações para a avaliação e a prescrição do exercício aeróbio.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

As informações foram consultadas em bases de dados integradas da área de saúde pelos sistemas Athena e Parthenon (catálogos de periódicos e da rede de Bibliotecas Públicas Estaduais e Federais do Estado de São Paulo) e Ingenio (catálogo de Bibliotecas e periódicos eletrônicos subsidiado pela Universidade Politécnica de Madri, Espanha), que integram as bases Turnitin, Google Scholar, Scielo, PubMed, Portal de Periódicos Capes, SportDiscus, Scopus. O levantamento bibliográfico foi realizado seguindo os procedimentos listados abaixo:

- a) Inserção de palavras-chave sobre a problemática deste estudo nas referidas bases de dados: cinética de VO_2 , componente lento do VO_2 , domínios de intensidade do exercício, perfil metabólico e ajustes matemáticos do VO_2 ;
- b) Foram considerados apenas textos disponíveis na íntegra, a partir de 1990, abrangendo duas décadas de investigação sobre o componente lento da cinética do VO_2 .

Assim, foi encontrada uma amostragem inicial de 139 referências. Foram usadas referências que abordassem a teoria da cinética do VO_2 , fatores que influenciam o componente lento do VO_2 , os mecanismos que explicam o componente lento do VO_2 , aspectos metodológicos da análise da cinética do VO_2 e parâmetros utilizados na delimitação dos domínios de exercício. No total, foram utilizadas 40 referências bibliográficas.

IMPORTÂNCIA FISIOLÓGICA DO COMPONENTE LENTO

A origem do CL tem sido relacionada à redução da eficiência muscular durante o exercício, que pode promover um ganho no VO_2 a partir dos 100-180 segundos até 360-600 segundos de exercício^{3,18,19}. O CL é caracterizado pela ocorrência de uma resposta adicional à primária. No domínio pesado de exercício, há uma estabilização tardia do VO_2 . No entanto, no domínio severo, o VO_2 atinge o valor máximo, caso a duração do exercício permita, e a amplitude do CL parece estar relacionada com a tolerância ao exercício²⁰.

Desta forma, o limite entre os domínios pesado e severo é importante para delimitar zonas de intensidade nas quais há uma mudança considerável na tolerância ao exercício. No exercício realizado no domínio severo, o CL pode estar associado à taxa de utilização anaeróbia e ao acúmulo de metabólitos (exemplo: fosfato inorgânico, íons de hidrogênio e de potássio)¹³. Portanto, estudos que analisassem o efeito da redução da magnitude do CL na tolerância ao exercício severo poderiam auxiliar a esclarecer melhor o efeito deste na performance de exercícios aeróbios de alta intensidade.

Apesar do acúmulo de lactato ter sido considerado como um dos possíveis mecanismos que explicariam o CL, esta relação parecer ser coincidente em vez de causal, uma vez que a infusão direta de lactato em um modelo de perfusão sanguínea no músculo isolado de humanos não causou alteração na taxa VO_2 /força durante contrações musculares isoladas na perna¹⁹. Já Sahlin et al.³ mostraram que a elevação na [La] muscular ou sanguínea com exercícios prévios realizados no domínio pesado é capaz de aumentar a amplitude da assíntota da resposta principal do VO_2 (A_1) e atenuar o CL (A_2). Portanto, estes autores concluíram que o efeito do aumento da [La] sobre a cinética do VO_2 não pode ser desconsiderado, uma vez que esta pode funcionar como um possível sinalizador de uma maior demanda de O_2 no exercício e, conseqüentemente, uma possível redução da capacidade de trabalho no decorrer da atividade.

Dessa maneira, se a resposta primária da cinética do VO_2 fornece, pelos parâmetros temporais, uma aproximação adequada dos processos de transporte e utilização de O_2 no músculo⁴, informações relacionadas ao início da difusão gasosa no músculo (TD_1) e a taxa de incremento do VO_2 (t_1)²¹, as diferenças observadas nestes parâmetros entre indivíduos treinados e não treinados deve-se, provavelmente, ao consumo muscular de O_2 (QO_2) e a velocidade de ajuste do metabolismo oxidativo à demanda energética do exercício. Essa especulação é respaldada por estudos que sugerem ocorrer menor inércia do metabolismo oxidativo e menor déficit de O_2 no exercício realizado por indivíduos treinados^{14-16,22}. De fato, a manifestação do CL parece associada ao maior custo de ATP na produção de força (redução da eficiência muscular), respondendo por mais de 80% da resposta do CL⁴.

A proporção do déficit de O_2 pode ter também grande influência sobre a tolerância ao exercício. Um pequeno déficit ocorre pela hidrólise de fosfocreatina e utilização dos estoques de O_2 intramusculares, que estão presentes quando a transição ao exercício é iniciada. Por consequência, a perturbação metabólica resultante é pouca. Por outro lado, quando o exercício é intenso um grande déficit tende a esgotar as reservas finitas de O_2 e utilizar parcialmente as reservas de glicogênio, com consequente formação de íons hidrogênio, que perturbam o meio intercelular e podem contribuir para a fadiga periférica²³ e reduzir a tolerância ao exercício²⁰.

Os parâmetros temporais e de amplitude da cinética do VO_2 permitem entender como o perfil da resposta do VO_2 ao início do exercício pode estar associado à tolerância ao exercício. Murgatroyd et al.²³ demonstraram que o ajuste mais rápido da resposta primária do VO_2 (t menor) ao início do exercício permite alcançar uma amplitude maior do VO_2 em uma maior intensidade (carga ou velocidade) de esforço, contribuindo para uma maior tolerância ao exercício, quando comparado ao ajuste mais lento do VO_2 (t maior). De fato, esses autores mostraram que a cinética do VO_2 está associada aos parâmetros do modelo potência-tempo, à potência crítica (PC) e à capacidade de trabalho anaeróbio (CTA). Neste estudo, houve uma correlação negativa entre o t da fase fundamental e a PC ($r = -0,95$), e positiva entre a CTA e o CL ($r = 0,84$). Ou seja, os maiores valores de PC e CTA são atingidos por indivíduos com cinética do VO_2 mais rápida e maior CL, respectivamente. Além disto, estes autores propõem que alguns processos metabólicos associados à fadiga e o progressivo esgotamento da CTA podem determinar a magnitude do CL e contribuir para a intolerância ao exercício severo.

PERFIL METABÓLICO, CARDIORRESPIRATÓRIO E CARACTERIZAÇÃO DOS DOMÍNIOS DE INTENSIDADE DE EXERCÍCIO

A resposta do lactato sanguíneo e do VO_2 durante exercícios com intensidade constante tem sido utilizada para definir os domínios de intensidade do exercício¹⁴. O exercício praticado no domínio moderado envolve intensidades até o limiar de lactato (LL), no qual a [La] apresenta estabilidade em

valor próximo ao de repouso e o VO_2 projeta-se monoexponencialmente a uma fase estável após 2-3 min, apresentando uma demanda de 9-11 $\text{mLO}_2 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ ^{24,25}. No exercício pesado (intensidade entre o LL e a PC), há um componente lento da resposta do VO_2 , que se superpõe ao aumento rápido inicial e conduz tardiamente à estabilidade. Por sua vez, o exercício severo (realizado acima da PC) é o único caracterizado pela indução ao $\text{VO}_{2\text{max}}$, podendo ser tolerado por até 10 minutos^{13,14,16} (figura 1).

Atribui-se à análise da cinética do VO_2 , o papel de descrever matematicamente. A magnitude do VO_2 e o tempo decorrido para que o sistema cardiocirculatório e o metabolismo muscular ajustem a oferta de O_2 à demanda muscular (QO_2), permitem inferir sobre a interação de fatores, desde a capacidade de transporte à atividade mitocondrial, responsáveis por projetar VO_2 e QO_2 ao estado de estabilidade^{14,16,21}. Assim como, permitem descrever eventos metabólicos (déficit de O_2 e perturbação do equilíbrio ácido-base) responsáveis por uma associação tardia, ou completa dissociação entre VO_2 e QO_2 durante o exercício de intensidade constante^{15,26}.

Ainda sob discussão, a velocidade de ajuste do VO_2 está limitada à inércia metabólica (velocidade de ajuste da cadeia de reações químicas do metabolismo oxidativo na mitocôndria, modulado pela concentração de creatina fosfato e pela enzima piruvato desidrogenase) e ao fornecimento de O_2 ao músculo (capacidade difusiva, geralmente avaliada pela resposta da frequência cardíaca ou débito cardíaco)^{4,14,21}. Contudo, à medida que os sistemas se interagem para associar o fornecimento de O_2 à sua demanda, também se altera a produção de dióxido de carbono (VCO_2), seja pela ativação do metabolismo aeróbio, pelo tamponamento de H^+ pelo bicarbonato (HCO_3^-), ou pelas alterações das reservas de CO_2 ²⁷. O perfil de resposta de VCO_2 (velocidade ajuste e amplitude) nos domínios moderado, pesado e severo do exercício está associado substancialmente ao comportamento da ventilação (V_E) e da permuta de VO_2 em nível pulmonar^{1,27}.

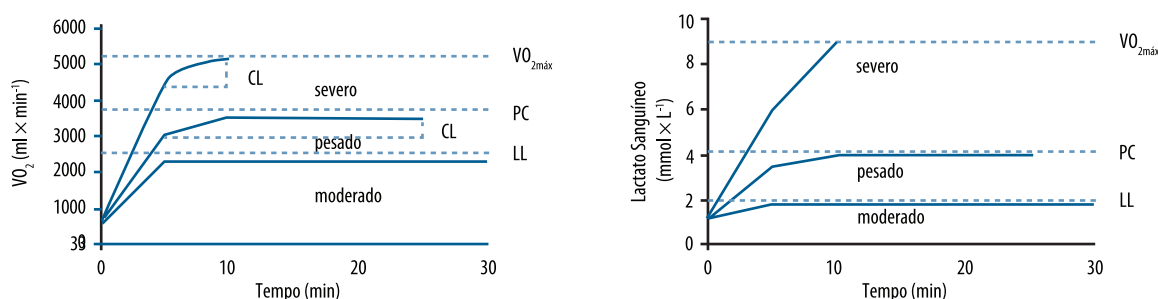


Figura 1. Representação gráfica da resposta do consumo de oxigênio (VO_2) e da concentração de lactato sanguíneo em diferentes domínios de exercício. LL - limiar de lactato; PC - potência crítica; $\text{VO}_{2\text{max}}$ - consumo máximo de oxigênio.

QUANTIFICAÇÃO E REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO PERFIL DO VO_2 NOS DIFERENTES DOMÍNIOS DE INTENSIDADE DO EXERCÍCIO

A caracterização da cinética do VO_2 por meio de componentes exponenciais sugere a presença de até três fases da resposta do VO_2 ¹⁸. Xu e Rodhes¹³ destacam a primeira fase, denominada fase I, ou componente cardiodi-

nâmico, sendo marcada por um rápido aumento no VO₂, representando os primeiros 15-25 segundos de exercício, que já é verificado na primeira respiração e representa o aumento da extração de O₂ alveolar pelo maior fluxo sanguíneo pulmonar, em função do aumento do débito cardíaco.

Esta fase ocorre em diferentes domínios de intensidade do exercício²⁵. A fase subsequente, chamada de fase II, ou componente primário, reflete o aumento no metabolismo oxidativo muscular (ciclo de Krebs e cadeia transportadora de elétrons), resultado do aumento da extração de O₂ na mistura venosa^{13,25}. Para Whipp et al.⁴, esta fase representa o consumo de O₂ pelos músculos ativos e mantém equivalência com a permuta de O₂ no leito capilar pulmonar. A terceira e última fase, denominada de fase III, ocorre com a estabilidade no débito cardíaco e na extração de O₂ pelos músculos, nos domínios moderado e pesado de exercício.

Quando ocorre aumento abrupto e imediato da carga de trabalho (e, portanto, na demanda de ATP), o VO₂ aumenta exponencialmente, e a resposta do VO₂ pode ser descrita por:

$$VO_2(t) = VO_{2b} + A \left[1 - e^{-\frac{(t-TD)}{\tau}} \right] \quad (1)$$

onde "VO₂(t)" representa a variável (mlO₂.min⁻¹) em um dado tempo (t); "VO_{2b}" é a linha de base de VO₂ (mlO₂.min⁻¹); "A" é a amplitude da curvatura exponencial (mlO₂.min⁻¹); "τ" é a constante de tempo em segundos (ou, o tempo em segundos necessário para atingir 63% da assíntota de resposta do VO₂ para uma intensidade do exercício); "TD" é o tempo de resposta (em segundos); "t" é o tempo do exercício; e "e" é a base dos logaritmos naturais².

Se a resposta exponencial inicial do VO₂, denominada componente cardiodinâmico, for considerada, o decurso da resposta do VO₂ após o início do exercício seria melhor descrito por:

$$VO_2(t) = VO_{2b} + A_0 \left[1 - e^{-\frac{t}{\tau_0}} \right] + A_1 \left[1 - e^{-\frac{(t-TD_1)}{\tau_1}} \right] \quad (2)$$

A equação 2 descreve duas fases da resposta do VO₂: a primeira exponencial, ou componente cardiodinâmico, começa no início do exercício e termina quando a segunda fase tem origem (TD₁), durante a segunda fase, denominada componente primário, a amplitude relevante (A₁) é definida como o aumento no VO₂ desde a linha de base até o valor da amplitude da assíntota da segunda exponencial (A₁), caso o CL não seja considerado no modelo⁴.

O modelo monoexponencial (desconsiderando o componente cardiodinâmico) tem sido sugerido para a interpretação da cinética do VO₂ após o início do exercício de intensidade moderada^{2,4} ou severa¹³. Em exercícios de intensidade pesada, a elevação do VO₂ continua por alguns minutos até que uma fase estável tardia seja alcançada³. Este aumento lento no VO₂ suplementa o traço da cinética monoexponencial inicial com uma exponencial independente, caracterizando o modelo matemático trifásico da resposta do VO₂ ao exercício constante em intensidade pesada. Uma nova função pode, então, ser descrita como:

$$VO_2(t) = VO_{2b} + A_0 \left[1 - e^{-t/\tau_0} \right] + A_1 \left[1 - e^{-(t-TD_1)/\tau_1} \right] + A_2 \left[1 - e^{-(t-TD_2)/\tau_2} \right] \quad (3)$$

onde a terceira exponencial, ou CL, tem a amplitude determinada pelo VO_{2c} , desde o TD_2 até o final do exercício (A_2), ao invés do VO_2 fornecido pelo valor da assintota desta exponencial (A_2)³⁴.

O termo exponencial que descreve a fase I da cinética deve ser delimitado pelo início da fase II (TD_1) e pela amplitude da fase I (A_0'), sendo calculado conforme a seguinte equação:

$$A_0' = A_0 \left(1 - e^{-TD_1/\tau_0} \right) \quad (4)$$

Assim, o aumento fisiológico relevante no VO_2 é a amplitude das fases I e II (A_1'), sendo determinada pela soma de ($A_0' + A_1$). A amplitude do CL (A_2') ao final do exercício é determinada por:

$$A_2' = A_2 \left(1 - e^{-(ED-TD_2)/\tau_2} \right) \quad (5)$$

onde "ED" é a duração do exercício.

Após filtrar (exclusão de ruídos associados à análise por respiração-a-respiração do VO_2 , sem câmara de mistura, que consistem em tossir e incursões respiratórias forçadas por suspiros ou sopros. Tem-se empregado a suavização por média móvel de dois desvios-padrões), interpolar e obter a média dos dados de VO_2 coletados respiração-a-respiração²³, em alguns exercícios de carga constante realizados na mesma intensidade, ou seja, transições. Os valores segundo-a-segundo são modelados pelas funções mono, bi ou triexponencial que empregam, por meio da regressão iterativa, o critério de convergência ajustado para minimizar o quadrado do erro entre os valores preditos e observados^{4,10,28}. Este procedimento de ajuste fornece os parâmetros de amplitude (variável de interesse, A), tempo de resposta (início da resposta em tempo, fornecido pela função, TD) e a constante de tempo (taxa de alteração do comportamento, t), que é um dos parâmetros mais críticos do modelo, porque indica o quão rápido o sistema está apto a se ajustar¹⁰. O uso de várias transições para a análise da cinética do VO_2 tende a melhorar a confiabilidade dos dados²⁹.

O tempo de resposta médio (MRT) é determinado utilizando uma exponencial simples e TD, após remover os 20 segundos iniciais da transição e ajustar a exponencial para começar do ponto inicial do exercício. O MRT é a soma algébrica do TD com o τ . Trata-se de uma constante empregada para cálculo do déficit de O_2 ao início da transição, que pode ser empregada nos domínios pesado e severo de exercício, conforme:

$$O_{2Def} = A_1' \times MRT \quad (6)$$

FATORES QUE INTERFEREM NO CL

O CL pode ser modificado em função de alguns fatores, como a idade, o ajuste matemático utilizado para determiná-lo, a intensidade, o tipo de exercício e o estado de treinamento. Em crianças, Armon et al.³⁰ verificaram menor magnitude do CL determinado por meio da diferença no VO_2 entre o terceiro e o sexto minuto de exercício (ΔVO_2 , 6-3min) em crianças em relação aos adultos, realizado a 50% Δ (Δ , 50% da diferença entre o VO_2 no LL e o VO_2 max). Resultados similares foram obtidos por Williams et al.³¹ durante o exercício em esteira rolante, cuja magnitude do CL determinado pelo ajuste tri-exponencial foi significativamente maior em homens adultos (289 $\text{mLO}_2\cdot\text{min}^{-1}$) do que nos meninos (19 $\text{mLO}_2\cdot\text{min}^{-1}$), quando comparados na mesma intensidade relativa (50% Δ) e com os valores de VO_2 corrigidos pela intensidade do exercício e massa corporal.

Fawkner e Armstrong³² verificaram, durante um estudo longitudinal, que o exercício realizado a 40% Δ no cicloergômetro em meninos e meninas, os valores relativos de CL, determinado por meio do ajuste bi-exponencial, podem aumentar entre o final da segunda infância (~9/10 anos) e o início do período pré-púbere (~12/13 anos), podendo atingir o mesmo valor que aqueles apresentados por adultos. Os autores atribuem o aumento do CL com o avanço da idade, devido à resposta mais lenta e menor amplitude da fase fundamental da cinética do VO_2 , em relação àquela anteriormente observada em uma dada intensidade de exercício, e ao fato das crianças apresentarem menor [La], devido a uma maior e mais rápida resposta do sistema oxidativo³². Além disso, segundo os autores, possivelmente as alterações na proporção de fibras tipo I e uma maior capacidade para gerar energia pelo sistema glicolítico anaeróbio podem ser fatores determinantes do CL nesse tipo de população. Não houve efeito do gênero no CL neste estudo.

Em relação aos efeitos do modo de exercício sobre a cinética do VO_2 , Machado et al.³³ analisaram os efeitos deste fator sobre o CL, determinado por meio do ajuste tri-exponencial, em crianças com idade entre 11-12 anos, durante o exercício realizado a 75% Δ em esteira e cicloergômetro, observando maior magnitude do CL no cicloergômetro (180,5 $\text{mLO}_2\cdot\text{min}^{-1}$) em comparação com o exercício realizado em esteira rolante (113 $\text{mLO}_2\cdot\text{min}^{-1}$). Os autores atribuem essas diferenças às diferenças biomecânicas entre os modos de exercício, que provavelmente modificam a relação entre custo de O_2 e intensidade do exercício ($\Delta\text{VO}_2/\Delta W$), devido ao tipo e ao padrão de recrutamento progressivo das fibras musculares, ativação das fibras fora dos padrões ótimos de velocidade para a força gerada, além de um possível efeito dos elevados níveis de tensão intramuscular durante a pedalada sobre a oclusão parcial dos vasos sanguíneos, que poderia restringir a oferta de O_2 aos músculos. Já a corrida apresenta ação muscular excêntrica, que tende a ter um menor custo energético e possibilita o armazenamento de energia elástica, que é liberada na fase concêntrica no ciclo alongamento-encurtamento. Além disso, na fase aérea da corrida há

uma redução da tensão, facilitando o fluxo de sangue e conseqüentemente a oferta do O₂ muscular³³.

O Quadro 1 apresenta referências do comportamento do CL para diferentes modalidades esportivas, nível de aptidão aeróbia da população analisada e métodos de análise para os domínios pesado e severo do exercício. De maneira geral, aspectos da resposta da curva do VO₂ são utilizados para se obter os principais parâmetros do CL, que são a amplitude, que representa a magnitude, e é expressa em mL O₂.min⁻¹, e o tempo de resposta, que representa o tempo de aumento do VO₂, e é expresso em segundos. Na quantificação do CL por meio dos modelos matemáticos, os parâmetros são determinados por meio do ajuste que melhor se adequou à curva do VO₂ (exemplo: R² ou Chi-square). Neste caso, são determinados os parâmetros de amplitude e tempo de resposta do CL. Na quantificação por meio do método pontual, são considerados dois pontos da curva do VO₂ (3^o e 6^o min) que, em média, representam o momento do início do CL e a estabilização do VO₂. Neste caso, o parâmetro que é obtido é a amplitude do CL. No entanto, a forma de determinação pode modificar o valor do CL, pois há uma variação individual dos momentos de início do CL e estabilização do VO₂. Portanto, particularmente em condições nas quais o início do CL pode ser antes do 3^o min, a quantificação por meio do método pontual pode ser subestimada. Todavia, a análise pode também ser realizada pelo método de resíduos, que mescla o modelo matemático ao pontual na análise da cinética do VO₂ nas fases II e III, respectivamente. Dados da quantificação do CL por métodos alternativos, como análise dos resíduos tendem a minimizar a controvérsia sobre o pressuposto de ser linear ou exponencial a natureza da resposta do VO₂ deste componente. Isso porque reserva o recurso do modelo matemático ao tratamento da resposta principal da cinética do VO₂, destacando-a da resposta subsequente. Assim, possibilita a detecção do início e amplitude do CL pela observação pontual do eixo do tempo e comparação do volume de O₂ ao final do exercício^{5,34,35}.

Quadro 1. Valores do componente lento obtidos a partir dos ajustes matemáticos em diferentes tipos de população e modalidades esportivas.

Estudo	Tipo de exercício	N	Características sujeitos	Domínios de intensidade	Intensidade	Metodologia	Componente lento
Reis et al. ⁴⁰	Natação	21	Treinados	Pesado	75%Δ VO ₂ max-LV	Ajuste Biexponencial	351 mL O ₂ .min ⁻¹
Pessôa-Filho et al. ³⁹	Natação	9	Treinados	Pesado e Severo	2,5% ± PCR	Ajuste Biexponencial	391 e 399 mL O ₂ .min ⁻¹
Reis et al. ⁸	Natação	14	Treinados	Pesado e Severo	75% e 100%Δ VO ₂ max-LV	Ajuste Biexponencial	362 e 234 mL O ₂ .min ⁻¹
Caritá et al. ³⁴	Ciclismo	6	Ciclistas bem treinados	Pesado	PC	Análise Pontual	401 mL O ₂ .min ⁻¹
Barbosa et al. ³⁵	Ciclismo	14	Ciclistas treinados	Pesado	MLSS	Análise Pontual	106 mL O ₂ .min ⁻¹
Carter et al. ⁶	Corrida	9	Ativos	Pesado	20,40 e 60%Δ VO ₂ max-LV	Ajuste Biexponencial	289 mL O ₂ .min ⁻¹
Jones e Mc-Connell ⁵	Corrida	8	Ativos	Pesado	50% Δ VO ₂ max-LV	Análise pontual	200 mL O ₂ .min ⁻¹

ΔVO₂max-LV: Diferença entre os valores de O₂ observados no VO₂max – Limiar Ventilatório; PCR: Ponto de compensação respiratória; PC: Potência crítica; MLSS: Máxima fase estável de lactato sanguíneo; ΔVO₂max-LL: Diferença entre os valores de O₂ observados no VO₂max – Limiar de Lactato.

Já a descrição matemática da cinética do VO₂, empregando o modelo biexponencial (equação 2), fornece a estimativa das amplitudes (A₁ e A₂), tempo de respostas (TD₁ e TD₂) e constantes de tempo (t₁ e t₂), excluindo o componente cardiodinâmico inicial, que se faz eliminando-se os 20 segundos iniciais da resposta ao exercício²⁸.

$$VO_2(t) = VO_{2b} + A_1 \left[1 - e^{-\left(\frac{t-TD_1}{\tau_1}\right)} \right] + A_2 \left[1 - e^{-\left(\frac{t-TD_2}{\tau_2}\right)} \right] \quad (7)$$

Neste modelo, o aumento fisiologicamente relevante do VO₂ é a amplitude da fase I (A₁'), ou componente "primário" da resposta, que deve refletir estritamente a cinética de extração do O₂ pelo músculo esquelético, que é calculada a partir da seguinte equação:

$$A_1' = A_1 \left(1 - e^{-\left(\frac{TD_2-TD_1}{\tau_1}\right)} \right) \quad (8)$$

Dado que o valor da assíntota da fase II (A₂) pode representar um valor maior que aquele realmente alcançado no final do exercício, o valor do VO₂ do componente exponencial lento ao final do exercício será definido como A₂', sendo calculado conforme a equação 5.

Entretanto, uma importante implicação quando se aplica o método pontual é que este método pode subestimar ou superestimar o início da presença do CL, já que indivíduos que apresentam uma resposta rápida do VO₂ podem iniciar o CL antes do 3º min, comprometendo o valor final, tornando o VO₂ final menor que o real.

Machado et al.³³ analisaram a quantificação do CL por dois diferentes métodos em crianças, modelo matemático triexponencial e o ΔVO₂ 6-3min. Os autores observaram que o CL determinado pelo modelo triexponencial (130 mL O₂.min⁻¹) foi significativamente maior do que o obtido pelo modelo ΔVO₂ 6-3min (69 mL O₂.min⁻¹). Os autores concluíram que os valores de CL obtidos durante o exercício de corrida realizado a 75%Δ são dependentes do modelo de análise (triexponencial vs. ΔVO₂ 6-3min), pois como crianças tendem a apresentar uma resposta mais rápida da cinética do VO₂, o método pontual pode subestimar o CL.

O CL pode modificar também dependendo da intensidade do exercício. Carter et al.⁶ (Quadro 1) analisaram a cinética do VO₂ durante a corrida, nos domínios pesado e severo de exercício. De acordo com estes autores, há um aumento da amplitude do CL com o incremento da intensidade (20, 40 e 60%Δ). Nas intensidades de 80 e 100%Δ, o VO₂max é atingido, já que não há estabilização deste parâmetro. Além disso, o tempo de início da resposta (TΔ₂) do CL é mais precoce com o aumento da intensidade.

Outro fator que também parece interferir na resposta dos parâmetros da cinética do VO₂ é o estado de treinamento. Koppo et al.¹¹ observaram que, ao final da transição de oito minutos, o VO₂ atingiu 91,6% e 83,0% do seu máximo nos indivíduos treinados e não treinados, respectivamente.

Apesar destes autores não identificarem características diferentes quanto ao domínio, enfatizaram que a resposta primária da cinética do VO_2 é mais lenta em indivíduos não treinados. A explicação para o maior retardo na cinética do VO_2 pode ser devido à diferença de perfusão e densidade capilar entre os sujeitos, mas substancialmente ao tipo de fibra recrutado e sua inércia oxidativa, que é capaz de alterar a relação QO_2/VO_2 .

Para Koppo et al.¹¹, é muito provável que indivíduos não treinados recrutem um percentual maior de fibras tipo II, à medida que o exercício progride em tempo ou intensidade, quando comparados aos indivíduos treinados que, por sua vez, tendem a apresentar uma maior fração de fibras I recrutadas. Esse padrão de recrutamento auxilia na explicação de um maior CL nos indivíduos não treinados, pelo fato de serem as fibras tipo II menos eficientes na geração de força (maior custo de ATP), apresentar elevado conteúdo e utilização de fosfocreatina, que podem contribuir para acentuada inércia oxidativa, lento ajuste do QO_2 à demanda de ATP e aumento do déficit de O_2 .

Da mesma forma, Gaesser e Poole³⁶ sugerem que um menor CL presente nos indivíduos treinados pode ser devido, provavelmente, à redução no recrutamento de fibras do tipo II para uma mesma carga absoluta. A influência do nível de condicionamento sobre o CL também foi analisada no estudo longitudinal de Womack et al.³⁷, no qual os autores analisaram o efeito do treinamento sobre o CL e verificaram uma redução de $220 \text{ mL O}_2 \cdot \text{min}^{-1}$ e de $2,3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ de lactato sanguíneo em exercícios com carga constante, no domínio pesado, após duas semanas de treinamento em bicicleta estacionária, com sessões entre 68% e 77% VO_2 pico. Para estes autores, é plausível associar a ocorrência de uma significativa porção do CL ao padrão de recrutamento das unidades motoras, sendo as alterações neuromusculares decorrentes do treinamento aeróbico responsáveis em parte pela atenuação do CL.

Koppo et al.¹¹ comparando indivíduos não treinados com indivíduos treinados no ciclismo, verificaram valores maiores a 80% LV I (aumento no equivalente respiratório do VO_2 , sem aumento no equivalente respiratório da produção de gás carbônico) e 50% Δ para os indivíduos treinados (229 e 334 W) em relação aos indivíduos não-treinados (110 e 192 W), portanto, em indivíduos treinados parece que há um deslocamento dos índices submáximos que pode modificar o tamanho do domínio do exercício.

Na natação, alguns estudos também sugerem que o LL e os limiares ventilatórios ocorrem em intensidades elevadas. Greco et al.³⁸ verificaram em nadadores treinados que o LL correspondeu a 83% da velocidade máxima de 400 m. Já Pessoa Filho et al.³⁹ (Quadro 1) analisaram o perfil do VO_2 por um modelo biexponencial, que forneceu os valores em torno do ponto de compensação ventilatória (PCR), caracterizando os domínios pesado (36% Δ e 76,5% VO_2 max) e severo (71% Δ e 91,3% VO_2 max) do exercício. No domínio pesado (abaixo do PCR), o VO_2 atingiu 91% do seu valor máximo, após um CL com início de resposta aos 154 segundos. O VO_2 no domínio severo (acima do PCR) atingiu o valor máximo e apresentou

início da resposta do CL aos 188 segundos. O modelo bi-exponencial apresenta boa validade para a determinação do CL na natação, pois Reis et al.^{8,40} apresentaram valores compatíveis aos resultados de Pessoa Filho et al.³⁹ para o mesmo domínio de intensidade e características da população analisada (Quadro 1).

Portanto, a idade, o nível de treinamento aeróbio e o tipo de exercício são fatores que podem modificar a amplitude do CL. O CL está associado à tolerância ao exercício, porque reflete o quanto o ajuste do sistema oxidativo ao início da transição repouso-exercício diminui a degradação de fosfocreatina, a demanda sobre o metabolismo glicolítico, o acúmulo de metabólitos associados à fadiga periférica e o déficit de O_2 . Estes aspectos deveriam ser levados em consideração na avaliação aeróbia e na prescrição do exercício aeróbio com objetivos de melhora da performance ou da saúde em diferentes populações.

CONCLUSÕES

Em domínios de intensidade pesado e severo, observa-se um aumento adicional do VO_2 , acima dos valores obtidos com a resposta primária ao exercício. No domínio pesado, há a estabilização tardia do VO_2 em valores acima do predito pela relação carga x VO_2 . No domínio severo, não há estabilização do VO_2 , que aumenta progressivamente até atingir o VO_2max . Entre os fatores que influenciam a magnitude do CL estão o nível de condicionamento físico, o tipo de exercício, a idade cronológica e a distribuição dos tipos de fibras.

Todavia, o CL também pode apresentar amplitude e tempo de resposta dependente do procedimento empregado em sua quantificação. Sua determinação por modelos matemáticos tende a reduzir a subjetividade inerente à observação visual que, em parte, também pode modificar o pontual ou a curva de resíduos.

O CL expressa uma menor eficiência muscular e, no domínio severo, tende a direcionar o VO_2 a valores máximos, o que tem sido sugerido como um importante aspecto da tolerância ao exercício. A redução do CL com o treinamento pode ter importantes implicações práticas para o aumento da tolerância ao exercício severo. Portanto, para os atletas que realizam provas com duração de até 15 min, aproximadamente, este aspecto pode ter implicações para a performance e auxiliar na elaboração do treinamento. No entanto, mais estudos que analisem os efeitos da redução do CL na tolerância ao exercício e na performance poderiam auxiliar a compreender os fatores associados ao CL e à tolerância ao exercício.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fapesp e CNPq. O autor DMPF agradece, em específico, o apoio do CsF (PDE:237942/2012-7).

REFERÊNCIAS

1. Whipp BJ, Ward SA. Physiological determinants of pulmonary gas exchange kinetics during exercise. *Med Sci Sports Exerc* 1990;22(1):62-71.
2. Barstow TJ, Jones AM, Nguyen PH, Casaburi R. Influence of muscle fiber type and pedal frequency on oxygen uptake kinetics of heavy exercise. *J Appl Physiol* 1996;81(4):1642-50.
3. Sahlin K, Sorensen JB, Gladden LB, Rossiter HB, Pedersen PK. Prior heavy exercise eliminates VO₂ slow component and reduces efficiency during submaximal exercise in humans. *J Physiol* 2005; 564(3):765-73.
4. Whipp BJ, Ward SA, Rossiter HB. Pulmonary O₂ uptake during exercise: conflating muscular and cardiovascular responses. *Med Sci Sports Exerc* 2005;37(9):1574-85.
5. Jones AM, McConnell AM. Effect of exercise modality on oxygen uptake kinetics during heavy exercise. *Eur J Appl Physiol* 1999;80(3):213-9.
6. Carter H, Pringle JS, Jones AM, Doust JH. Oxygen uptake kinetics during treadmill running across exercise intensity domains. *Eur J Appl Physiol* 2002;86(4):347-54.
7. Koppo K, Bouckaert J. The Decrease in the VO₂ slow component induced by prior exercise does not affect the time to exhaustion. *Int J Sport Med* 2002;23(4):262-7.
8. Reis JF, Alves FB, Bruno PM, Vleck V, Millet GP. Effects of aerobic fitness on oxygen uptake kinetics in heavy intensity swimming. *Eur J Appl Physiol* 2012;112(5):1689-97.
9. Billat VL, Richard R, Binsse VM, Koralsztein JP, Haouzi P. The VO₂ slow component for severe exercise depends on type of exercise and is not correlated with time to fatigue. *J Appl Physiol* 1998;85(6):2118-24.
10. Scheuermann BW, Hoelting BD, Noble ML, Barstow TJ. The slow component of O₂ uptake is not accompanied by changes in muscle EMG during repeated bouts of heavy exercise in humans. *J Physiol* 2001; 531(1):245-56.
11. Koppo K, Bouckaert J, Jones AM. Effects of training status and exercise intensity on phase II VO₂ kinetics. *Med Sci Sports Exerc* 2004;36(2):225-32.
12. Machado FA, Guglielmo LGA, Greco CC, Denadai BS. Effects of exercise mode on the oxygen uptake kinetic response to severe-intensity exercise in prepubertal children. *Pediatr Exerc Sci* 2009;21(2):159-70.
13. Xu F, Rhodes EC. Oxygen uptake kinetics during exercise. *Sports Med* 1999;27(5):313-27.
14. Poole DC, Barstow TJ, Mcdbnough P, Jones AM. Control of Oxygen Uptake during Exercise. *Med Sci Sports Exerc* 2008;40(3):462-74.
15. Jones AM, Burnley M. Oxygen uptake kinetics: an underappreciated determinant of exercise performance. *Int J Sports Phys Perf* 2009;4(4):524-32.
16. Jones AM, Grassi B, Christensen PM, Krstrup P, Bangsbo J, Poole DC. Slow Component of VO₂ Kinetics: Mechanistic Bases and Practical Applications. *Med. Sci. Sports Exerc* 2011;43(11):2046-62.
17. Burnley M, Vanhatalo A, Jones AM. Distinct profiles of neuromuscular fatigue during muscle contractions below and above the critical torque in humans. *J Appl Physiol* 2012;113(2):215-23.
18. Grassi B. Regulation of oxygen consumption at exercise onset: is it really controversial? *Exerc Sport Sci Rev* 2001;29(3):134-8.
19. Poole DC, Barstow TJ, Gaesser GA, Willis WT, Whipp BJ. VO₂ slow component: physiological and functional significance. *Med Sci Sports Exerc* 1994;26(11):1354-8.
20. Caritá RAC, Pessôa Filho DM, Greco CC. Cinética do VO₂ durante o exercício realizado na potência crítica em ciclistas e indivíduos não-treinados no ciclismo. *Rev Motriz* 2013;19(2):412-22.
21. Grassi B. Oxygen uptake kinetics: old and recent lessons from experiments on isolated muscle in situ. *Eur J Appl Physiol* 2003;90(3-4):242-9.
22. Jones AM, Vanhatalo A, Burnley M, Morton RH, Poole DC. Critical power: implications for determination of VO₂max and exercise tolerance. *Med Sci Sports Exerc* 2010;42(10):1876-90.
23. Murgatroyd SR, Ferguson C, Ward SA, Whipp BJ, Rossiter HB. Pulmonary O₂ uptake kinetics as a determinant of high-intensity exercise tolerance in humans. *J Appl Physiol* 2011;110(6):1598-606.

24. Bearden SE, Moffatt RJ. VO₂ slow component: to model or not to model? *Med Sci Sports Exerc* 2001;33(4):677-80.
25. Jones AM, Poole DC. Oxygen uptake dynamics: from muscle to mouth-an introduction to the symposium. *Med Sci Sports Exerc* 2005;37(9):1542-50.
26. Burnley M, Davison G, Baker JR. Effects of priming exercise on VO₂ kinetics and the power-duration relationship. *Med Sci Sports Exerc* 2011;43(11):2171-9.
27. Whipp BJ. Physiological mechanisms dissociating pulmonary CO₂ and O₂ exchange dynamics during exercise in humans. *Exp Physiol* 2007;92(2):347-55.
28. Ozyener 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.
29. Lamarra N, Whipp BJ, Ward SA, Wasserman K. Effect of interbreath fluctuations on characterizing exercise gas exchange kinetics. *J Appl Physiol* 1987;62(5):2003-12.
30. Armon Y, Cooper DM, Flores R, Zanconato S, Barstow TJ. Oxygen uptake dynamics during high-intensity exercise in children and adults. *J Appl Physiol* 1991;70(2):841-8.
31. Williams CA, Carter H, Jones AM, Doust JH. Oxygen uptake kinetics during treadmill running in boys and men. *J Appl Physiol* 2001;90(5):1700-6.
32. Fawcner SG, Armstrong N. Longitudinal changes in the kinetic response to heavy intensity exercise in children. *J Appl Physiol*. 2004;97(2):460-6.
33. Machado FA, Guglielmo LGA, Greco CC, Denadai BS. Componente lento do VO₂ em crianças durante exercício pesado de corrida: análise com base em diferentes modelos matemáticos. *Rev Bras Med Esporte* 2006;12(6):308-12.
34. Caritá RAC, Greco CC, Denadai BS. Máxima fase estável de lactato sanguíneo e potência crítica em ciclistas bem treinados. *Rev Bras Med Esp* 2009;15(5):370-3.
35. Barbosa LF, de Souza MR, Pelarigo JG, Caritá RAC, Caputo F, Denadai BS, Greco CC. Máxima fase estável de lactato sanguíneo e o limite superior do domínio pesado em ciclistas treinados. *Rev Bras Cineantropom Desempenho Hum* 2009;11(3):320-5.
36. Gaesser GA, Poole DC. The slow component of oxygen uptake kinetics in humans. *Med Sci Sport Exerc* 1996;24:35-71.
37. Womack CJ, Davis SE, Blumer JL, Barrett E, Weltman AL, Gaesser GA. Slow component of O₂ uptake during heavy exercise: adaptation to endurance training. *J Appl Physiol* 1995;79(3):838-45.
38. Greco CC, Oliveira MF, Caputo F, Denadai BS, Dekerle J. How narrow is the spectrum of sub-maximal speeds in swimming? *J Strength Cond Res* 2013;27(5):1450-4.
39. Pessôa Filho DM, Alves FB, Reis JF, Greco CC, Denadai BS. VO₂ kinetics during heavy and severe exercise in swimming. *Int J Sports Med* 2012;33(9):744-8.
40. Reis JF, Alves FB, Bruno PM, Vleck V, Millet GP. Oxygen Uptake kinetics and middle distance swimming performance. *J Sci Med Sport* 2012;15(1):58-62.

Endereço para correspondência

Renato Aparecido Corrêa Caritá
UNESP, Departamento de Educação Física
Laboratório de Avaliação da Performance Humana
Avenida 24A, 1515, Bela Vista
13506-900. Rio Claro, SP, Brasil
E-mail: recarita@hotmail.com