

VARIÁVEIS FISIOLÓGICAS ASSOCIADAS COM O DESEMPENHO EM PROVAS DE LONGA DURAÇÃO: das tradicionais as contemporâneas.

Salomão Bueno¹

Nilo M Okuno²

Adriano E Lima-Silva³

Rômulo Bertuzzi⁴

Resumo:

Tradicionalmente variáveis como o consumo máximo de oxigênio, os limiares ventilatórios e a economia de corrida têm sido utilizados para determinar o desempenho aeróbio. No entanto, têm se sugerido que variáveis máximas como a velocidade pico determinada em esteira e submáxima como a cinética *on* do consumo de oxigênio também seriam importantes. Diante disso, o objetivo dessa revisão é apresentar evidências da relação entre as variáveis fisiológicas associadas com o desempenho aeróbio para modalidades de longa duração. Sendo assim foram selecionados na base de dados *PubMed*, estudos desde 1923 até os mais recentes. Dessa forma, com base nos estudos analisados compreende-se que para modalidades de longa duração, devem ser utilizadas as variáveis máximas e submáximas quando o objetivo é prever o desempenho.

Palavras chave: consumo máximo de oxigênio, limiares ventilatórios, economia de corrida, cinética *on* do consumo de oxigênio, velocidade pico em esteira

PHYSIOLOGICAL VARIABLES ASSOCIATED WITH ENDURANCE PERFORMANCE: traditional to cotemporary

Abstract: Traditionally maximal oxygen uptake, ventilator threshold and running economy have been used to quantify the endurance performance. More recently, the velocity peak in treadmill and on kinetic for oxygen uptake have been highlighted. Thus, the aim of this review is to present the main physiological variables associated with endurance performance in sports of the long time. Therefore a search was performed at Pubmed database being chosen articles since 1923 until the current. According to the studies presented in this review, have been acknowledged that in use of the maximal and submaximal variables correlated were very important for determine the endurance performance.

Key words: maximal oxygen uptake, ventilatory threshold, running economy, oxygen uptake on kinetic, peak treadmill velocity.

¹ Escola de Educação Física e Esportes – USP, Brasil.

² Prof. Dr. Departamento de Educação Física da Universidade Federal de Ponta Grossa, Paraná, Brasil.

³ Prof. Dr. Departamento de Educação Física da Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, Brasil.

⁴ Prof. Dr. Departamento de Esportes da EEFPE-USP, Brasil.

INTRODUÇÃO

Em atividades com duração superior a 60 segundos, a ressíntese das moléculas de ATP utilizadas para a contração muscular é realizada, sobretudo, por processos bioquímicos que dependem da presença de oxigênio (O_2) (Gastin *et al.*, 2001). Assim, os estudos em ciência do esporte vêm investigando a aptidão em modalidades dependentes do metabolismo aeróbio desde o início do século passado (Margaria *et al.*, 1933). Por esse motivo, diversas variáveis fisiológicas associadas ao desempenho também têm sido estudadas (Basset & Howley 2000; Bertuzzi *et al.*, 2013; Meyer *et al.*, 2005; Noakes *et al.*, 1999; Saunders *et al.*, 2004).

Entre essas variáveis destacam-se o consumo máximo de oxigênio ($\dot{V}O_{2\text{máx}}$) (Roberts *et al.*, 1932), os limiares ventilatórios (Wasserman & McLlory, 1964) e limiares de lactato (Denadai 1995), e a economia de corrida (EC) (Conley & Krahenbuhl, 1980). Por sua vez, entre as mais contemporâneas estão a velocidade pico atingida em teste progressivo máximo (V_{pico}) (Noakes *et al.*, 1999) (figura 1) e a cinética *on* do consumo de oxigênio ($\dot{V}O_2$) (Rossiter *et al.*, 2002).

De maneira conjunta, as variáveis apresentadas acima vêm sendo comumente associadas com o desempenho aeróbio (Basset e Howley, 2000). Além disso, o entendimento da importância de cada uma dessas variáveis tem contribuído de forma significativa no processo de prescrição, seleção e controle do treinamento (Denadai 1995). Sendo assim, o objetivo desse trabalho é apresentar uma revisão sobre os principais variáveis máximas e submáximas associadas com o desempenho aeróbio em modalidades de longa duração. Para tanto, foi realizada uma busca sistemática no banco de dados *PubMed*, utilizando as seguintes palavras isoladamente e combinadas: *running performance, endurance performance, maximal oxygen uptake, ventilatory threshold, running economy, peak velocity e oxygen uptake kinetics*.

CONSUMO MÁXIMO DE OXIGÊNIO ($\dot{V}O_{2\text{máx}}$)

Entre as principais variáveis fisiológicas, a mais tradicional é o consumo máximo de oxigênio ($\dot{V}O_{2\text{máx}}$). O $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ é um índice representativo da quantidade de oxigênio por unidade de tempo que o organismo consegue extrair do ambiente, transportar pelo sistema circulatório para que seja então utilizado pelas células para o processo de ressíntese de ATP por via metabolismo aeróbio (Basset & Howley, 2000). Sendo assim, altos valores do $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ são importantes na realização de atividades físicas em que a demanda de oxigênio imposta pelo músculo esquelético é alta, como por exemplo, durante uma corrida de 5 km (Bosquet *et al.*, 2002).

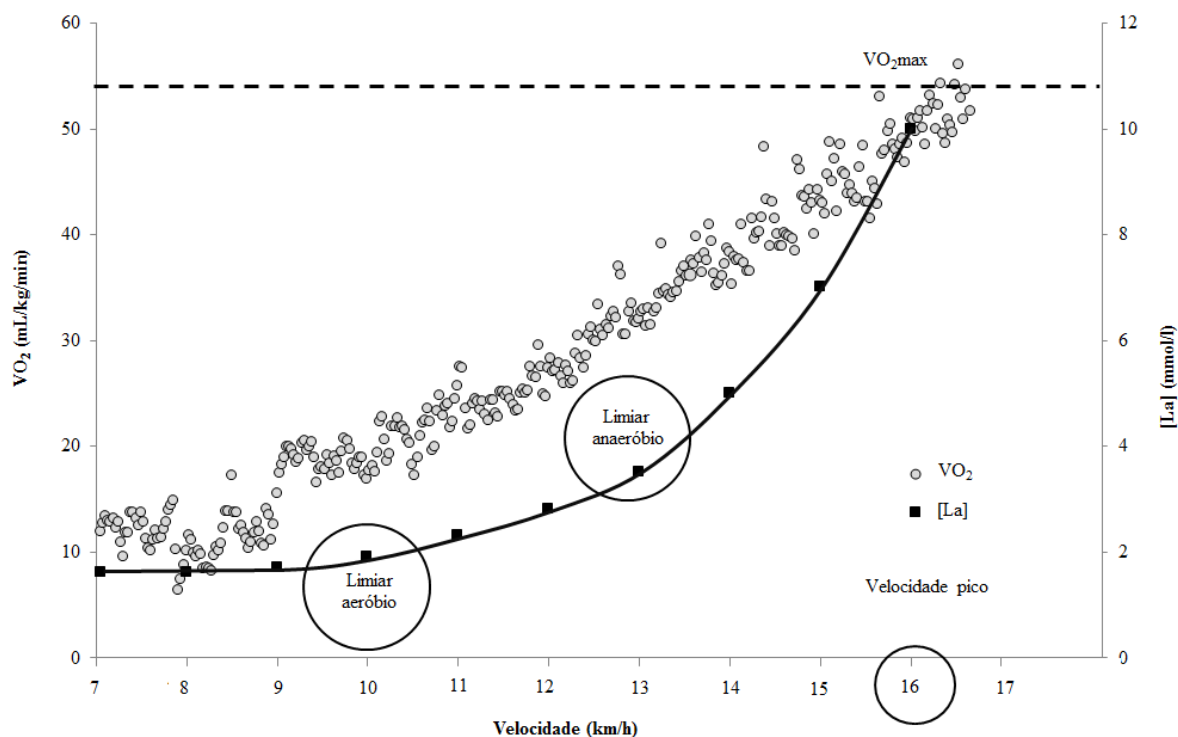


Figura 1. Gráfico de consumo de oxigênio e da concentração de lactato sanguíneo durante a realização de teste progressivo.

Essa importante variável tem sido amplamente estudada nas pesquisas desde o início do século passado (Robinson *et al.*, 1938; Rabadan *et al.*, 2011; Sjödín & Svendenhag 1985). As primeiras evidências foram apresentadas por Hill e Lupton (1923), que demonstraram que o consumo de oxigênio ($\dot{V}O_2$) para uma atividade possuía uma relação linear com a intensidade do esforço. Verificaram também que nas intensidades próximas ao máximo, o $\dot{V}O_2$ perdia sua característica de aumento linear com a intensidade e se estabilizava mesmo com o aumento da intensidade (Hill & Lupton 1923). A partir dessa análise, surgiram os primeiros indícios sobre $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ (Hill & Lupton 1923).

Robinson *et al.* (1938) foram os primeiros a associar os altos valores do $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ com o resultado em modalidades esportivas, como provas de longa duração, constatando que os atletas com melhor desempenho apresentavam os maiores valores do $\dot{V}O_{2\text{máx}}$. De forma similar Saltin e Astrand (1967), associaram o $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ com os melhores resultados em modalidades predominantemente aeróbias, evidenciando que os atletas de alto nível apresentavam altos valores do $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ como, por exemplo, os corredores de distâncias maiores que 3000 metros, com valores de $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ de $75 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$. A partir desses resultados, chegou-se a conclusão de que existiria uma relação importante entre os altos valores de $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ com os melhores

resultados em provas predominantemente aeróbias.

Anos depois das primeiras evidências, uma série de estudos demonstrou que o $\dot{V}O_2$ máx poderia não ser sensível o suficiente para discriminar diferenças na aptidão em grupos homogêneos (Grant *et al.*, 1997; Noakes *et al.*, 1990; Rabadán *et al.*, 2011; Sjödín & Svendenhag, 1985). Por exemplo, Sjödín e Svendenhag (1985), demonstraram que utilizar somente o $\dot{V}O_2$ máx não seria capaz o suficiente de prever o desempenho em corridas, pois indivíduos com valores similares de $\dot{V}O_2$ máx apresentavam diferentes resultados em provas. Posteriormente, Noakes *et al.* (1990) evidenciaram valores mais significativos de correlação entre a velocidade pico em esteira e resultado em prova ($r = 0,91$) do que comparado os valores de correlação entre o $\dot{V}O_2$ máx ($r = 0,86$). Similarmente, Grant *et al.* (1997) também constataram correlações de $r = 0,93$ para a velocidade do PCR e os tempos de corrida de longa duração, ao passo que o $\dot{V}O_2$ máx apresentou valores de $r = 0,70$.

Em um estudo mais recente, Rabadán *et al.* (2011) propuseram um modelo para predição do desempenho em corridas predominantemente aeróbias. Para tanto foram recrutados atletas de provas de longa distância (distâncias de 5000 à 10000 metros, $n = 32$) e atletas de provas de média distância (distâncias compreendidas entre 800 e 1500 metros, $n = 40$) e todos atletas realizaram um teste progressivo até a exaustão voluntária máxima. Identificou-se uma importante associação entre o $\dot{V}O_2$ máx e o sucesso nessas modalidades. No entanto, observou que utilizar somente o $\dot{V}O_2$ máx poderia subestimar os resultados e dessa forma, propondo um modelo capaz de prever 84,7% do resultado seria necessário acrescentar outras variáveis como a velocidade em que se atinge o ponto de compensação respiratória (PCR) e o $\dot{V}O_2$ na intensidade do PCR.

Dessa forma, a partir dos estudos apresentados é possível compreender que o $\dot{V}O_2$ máx é um clássico preditor da aptidão aeróbia (Basset & Howley 2000). Contudo, por mais que essa variável seja capaz de representar o máximo de energia proveniente do metabolismo aeróbio, as evidências têm demonstrado que utilizá-la sozinha pode não ser sensível o suficiente para discriminar diferenças nos tempos de provas em grupos homogêneos (Noakes *et al.*, 1990). Por esse motivo, têm se proposto a utilização de outras variáveis máximas e também de variáveis representantes de fatores submáximos.

LIMIARES METABÓLICOS

Entre as variáveis submáximas, os limares metabólicos são os tradicionalmente utilizados (Denadai, 1995; Meyer *et al.*, 2005). Durante a realização de atividades de longa duração, a capacidade do organismo em manter um possível equilíbrio metabólico dinâmico tem se apresentado como um fator importante para a continuidade do exercício (Hollosoy & Coyle, 1984). Diante disso, diferentes respostas fisiológicas do organismo para a intensidade do esforço ocorrem, como por exemplo a modificação na dinâmica dos gases espirados bem como as diferentes concentrações de lactato sanguíneo (Meyer *et al.* 2005) as quais têm sido consideradas importantes variáveis representativas do equilíbrio metabólico em eventos esportivos de longa duração (Basset & Howley 2000).

Ao realizar o exercício físico com aumento progressivo da intensidade, o organismo inicia uma série de processos metabólicos e fisiológicos para manter a continuidade da tarefa (Meyer *et al.*, 2005). Através desses processos é possível determinar os pontos de transição entre os domínios de intensidade do esforço, esses que podem ser classificados como os limiares metabólicos (Denadai 1995). Dentre as formas utilizadas para identificar os limiares, as duas mais utilizadas são através da concentração de lactato sanguíneo (Heck *et al.* 1985) e por meio dos gases expirados (Wasserman & McLlory, 1964). A determinação por meio da concentração sanguínea de lactato pode ser considerada a análise mais clássica, na qual as primeiras evidências do acúmulo desse metabólito no organismo foram demonstrados por Fletcher e Hopkins (1907). Esse acúmulo apresenta dois momentos associados a intensidade do exercício (Farrel *et al.* 1979), o primeiro momento o qual representa primeiro limiar, ocorre quando há um primeiro aumento da concentração de lactato durante o exercício acima dos valores basais (Wasserman *et al.* 1975), o segundo momento ocorre com o aumento da intensidade do exercício, há um ponto no qual a produção de lactato ultrapassa a capacidade de remoção, sendo que há o início do acúmulo de lactato no sangue (Farrel *et al.* 1979), sendo em alguns casos determinado a partir do valor fixo de 4 mmol (Heck *et al.* 1985).

Por sua vez, a dinâmica das trocas gasosas também apresenta um diferente comportamento em resposta a intensidade do exercício (Wasserman & McLlory, 1964). Essa diferente dinâmica dos gases expirados foi inicialmente apresentada por Wasserman e McLlory (1964). Segundo os autores, ao iniciar o esforço de baixa intensidade há um pequeno aumento na produção de lactato, em relação aos níveis de repouso, paralelamente há também um aumento na ventilação e no $\dot{V}O_2$ de forma proporcional com o aumento da intensidade do esforço. Em um determinado momento, com o prosseguir do aumento da intensidade, há um

ponto em que ocorre o acúmulo de lactato na corrente sanguínea, por sua vez a ventilação e a produção de CO_2 começam a aumentar além do $\dot{V}\text{O}_2$. Progredindo com o aumento da velocidade, há um segundo ponto, no qual a concentração de lactato aumenta mais rapidamente e a ventilação aumenta mais que a produção de CO_2 . Analisando esses fenômenos fisiológicos, constatou-se dois momentos em que as trocas gasosas apresentavam diferente comportamento, durante o exercício incremental, um momento no qual há o início do acúmulo de lactato sanguíneo em relação aos níveis de repouso, ocorrendo também um aumento da ventilação de forma proporcional ao aumento do $\dot{V}\text{O}_2$ e um segundo momento no qual a concentração de lactato sanguíneo aumenta rapidamente e a ventilação aumenta desproporcionalmente a produção de CO_2 , sendo classificados como os limiares ventilatórios, ou mais precisamente LV e o PCR (Ribeiro, 1995) (figura 2).

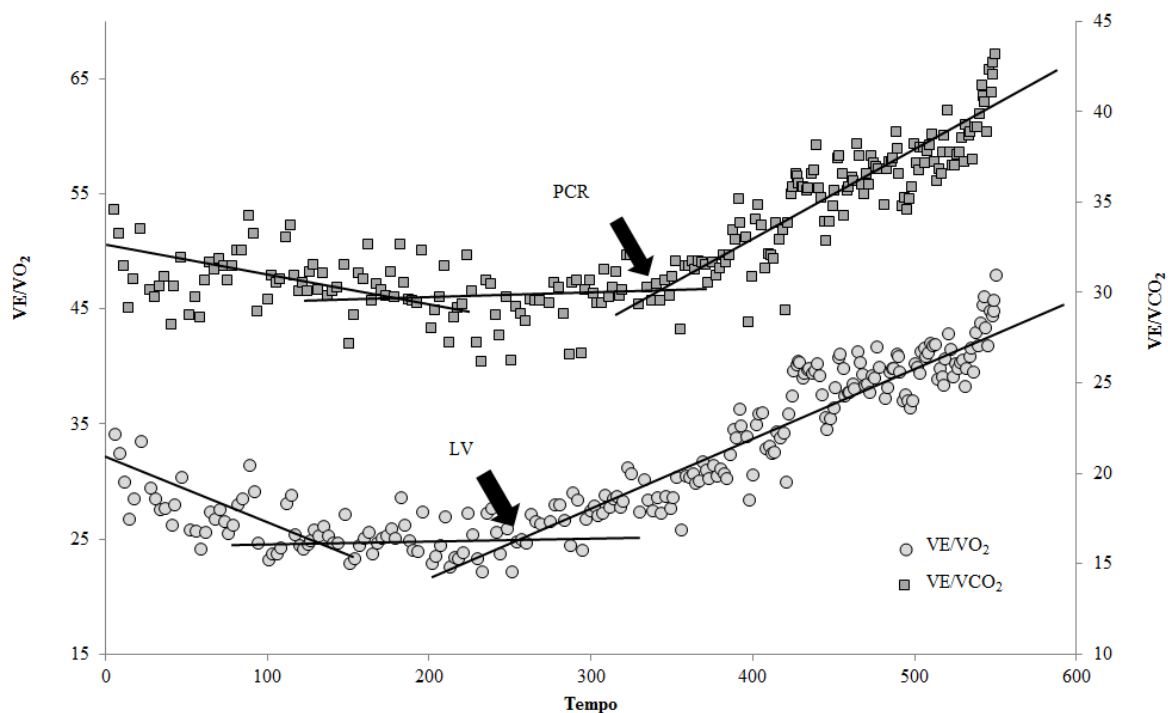


Figura 2. Gráfico da determinação do LV e PCR.

Essa relação entre o acúmulo de metabólitos, repostas ventilatórias e intensidade do exercício é capaz de representar diferentes processos (Ribeiro, 1995). A intensidade na qual ocorre o LV está associada a um processo de tamponamento eficiente do lactato (Wasserman *et al.*, 1965), apresentando uma maior oxidação de gordura (González-Haro, 2011), um maior recrutamento de fibras musculares do tipo I (Gollink *et al.*, 1973) e uma maior predominância do metabolismo aeróbio como fornecedor de energia (Gastin *et al.*, 2001). Por sua vez, a

intensidade posterior ao PCR representa uma ineficiência no tamponamento do lactato metabólico (Wasserman *et al.*, 1965), bem como um aumento na oxidação de carboidratos (González-Haro *et al.*, 2011), aumento no recrutamento de fibras do tipo II (Gollink *et al.*, 1973) e o início de um aumento da contribuição anaeróbia, mesmo não sendo predominante, para o fornecimento de energia (Gastin *et al.*, 2001). Em outras palavras, acredita-se que as intensidades em que ocorrem as diferentes dinâmicas do acúmulo de lactato sanguíneo estão correlacionado com o LV e PCR (Denadai 1995), e que estão associados com fenômenos fisiológicos importantes para o fornecimento de energia durante o esforço (Meyer *et al.*, 2005).

Além das pesquisas condicionadas à explicação do fenômeno fisiológico que precede a determinação do limiares metabólicos (Meyer *et al.*, 2005; Wasserman *et al.*, 1967), os estudos têm demonstrado que os limiares são sensíveis as modificações provenientes do treinamento (SJODIN & SVEDENHAG, 1982; DOUBOUCHAUD *et al.* 2000). Por exemplo, Sjodin *et al.* (1982) em um estudo que realizou treinamento aeróbio por 14 semanas com intensidade próxima a intensidade do PCR, identificaram modificações metabólicas importantes no sentido de melhora da via oxidativa, como diminuição significativa na concentração da enzima fosfofrutoquinase, uma diminuição na razão de fosfofrutoquinase e citrato sintase, aumento na densidade mitocondrial e a concentração de enzimas oxidativas, aumento na quantidade de enzimas da β -oxidação. Além disso, observou-se também que a intensidade na qual se atingia o PCR aumentou em relação às velocidades pré-treinamento. Doubouchaud *et al.* (2000) em estudo similar, observaram após nove semanas de treinamento, um aumento de 22% na intensidade na qual se atingia o segundo limiar de lactato, aumento de 75% na quantidade da enzima citrato sintase e também um aumento de 90% na expressão do transportador de monocarboxilato (MCT1), responsável pela captação do lactato pelas células musculares.

Em linhas gerais, é sugerido que os limiares ventilatórios estão positivamente correlacionados com o sucesso em modalidades predominantemente aeróbias (Meyer *et al.*, 2004). Mais precisamente, essa relação acontece quando se associa o PCR como uma forma de monitoramento das respostas do organismo ao estímulo de treinamento (Denadai, 1995; Sjodin *et al.*, 1982).

ECONOMIA DE CORRIDA (EC)

Dentre as variáveis determinantes da aptidão aeróbia, a economia de corrida (EC) também tem recebido destaque das pesquisas (Foster *et al.*, 2009; Saunders *et al.*, 2004). Esse preditor tem sido definido como o custo de energia para uma determinada intensidade submáxima (Foster & Lucia, 2007) ou como o $\dot{V}O_2$ para uma determinada velocidade (Coyle *et*

al., 1980). Muitas vezes é possível observar indivíduos com o mesmo $\dot{V}O_{2\text{máx}}$, mas com economia de corrida diferente (Daniels & Daniels, 1992).

Historicamente, as primeiras evidências sobre a importância da EC para a aptidão aeróbia foram apresentadas por Hill e Lupton (1923). Esses autores sugeriram que a capacidade do indivíduo em conseguir conservar as reservas de energia durante a corrida poderia ser um fator importante para a continuidade da tarefa. Alguns anos mais tarde, Astrand e Saltin (1967) identificaram que durante a realização da mesma tarefa, atletas com diferentes níveis de condicionamento físico apresentavam diferentes valores no $\dot{V}O_2$. Esses primeiros estudos apresentaram, ainda que de forma rudimentar, a relação entre uma menor utilização de oxigênio ou menor custo energético e o sucesso em modalidades predominantemente aeróbias (Astrand & Saltin, 1967; Hill e Lupton 1923).

Buscando uma melhor compreensão dessa relação, mais pesquisas foram realizadas para compreender a importância da EC para a corrida, como por exemplo, o estudo de Conley e Krahenbuhl (1980), no qual identificaram correlações positivas entre desempenho nos 10 km com a EC mensurada a 14 km/h ($r = 0,83$; $p < 0,01$), 16 km/h ($r = 0,82$; $p < 0,01$) e 17 km/h ($r = 0,79$; $p < 0,01$). Além disso, constataram que a EC foi responsável por 65% da variância dos tempos de corrida nos 10 km desses atletas. Com isso, concluiu-se que a EC seria uma importante variável fisiológica associada ao desempenho, destacando assim a importância da EC para modalidades aeróbias de longa duração.

Além das pesquisas que justificaram a importância da EC para a aptidão aeróbia (Conley & Krahenbuhl, 1980; Costill *et al.*, 1975), também foram desenvolvidos estudos com objetivo de identificar os fatores que influenciariam a EC (Saunders *et al.*, 2004). Um exemplo disso é o estudo de Bosco *et al.* (1987) no qual observaram associação entre a EC e o componente elástico do músculo esquelético. O componente elástico seria dependente da rigidez e da magnitude do estiramento da unidade músculo-tendão (Saunders *et al.*, 2004) e também capaz de acumular energia elástica e transferi-la sem apresentar gastos metabólicos. Com isso, durante a fase excêntrica da passada, a energia elástica é armazenada nos músculos, tendões e ligamentos, ao passo que na fase concêntrica essa energia acumulada é mecanicamente transferida. Dessa forma, essa transferência de energia contribui para o deslocamento do corpo sem aumento do gasto energético, melhorando a EC (Saunders *et al.*, 2004).

Uma forma de treinar os componentes neuromusculares envolvidos com a EC é o treinamento em que envolve componentes de potência, como *sprint* e o treinamento pliométrico. Paavolainen *et al.* (1999) verificaram que este tipo de treinamento ocasionou uma melhora no desempenho de 5 km devido a diminuição no tempo de contato durante a corrida,

com consequente aumento da EC.

Outro fator importante que se tem apresentado é a relação entre o metabolismo muscular e uma melhor EC (Holloszy *et al.*, 1984). Supõe-se que as adaptações mitocondriais do músculo esquelético, podem contribuir para uma respiração celular mais eficiente, através da atividade de enzimas importantes: succinato desidrogenase, NADH desidrogenase, NADH citocromo c-redutase e citocromo oxidase (Holloszy *et al.*, 1984). Em linhas gerais, as modificações metabólicas que contribuem para diferenças nos valores da EC estão associadas com uma maior atividade de enzimas importantes do metabolismo oxidativo e também com uma menor utilização das reservas de glicogênio (Foster & Lucia, 2007).

Com isso, a partir das evidências apresentadas, é possível compreender a importância da EC para corridas de longa duração (Helgerud *et al.*, 2010). A grande maioria das evidências apontam a importância da EC atrelada a fatores associados à rigidez do músculo esquelético (Bosco *et al.*, 1987; Saunders *et al.*, 2004) e poucas evidências demonstram a influencia de fatores metabólicos (Foster & Lucia, 2007). Essa pequena quantidade de evidências associando metabolismo energético e EC podem limitar em grande parte os resultados, haja vista que por ser representativa em alguns casos (Saunders *et al.*, 2004), fatores associados ao metabolismo podem ser interessantes de serem investigados. Com isso, apesar de já existirem muitos trabalhos já produzidos associando a EC com o desempenho em corrida de longa duração, ainda há lacunas a serem preenchidas.

CINÉTICA ON DO CONSUMO DE OXIGÊNIO

Dentre as variáveis consideradas mais contemporâneas, uma que se destaca é a análise do comportamento temporal do $\dot{V}O_2$ durante e após o exercício, sendo classificada como análise da cinética *on* e *off* do $\dot{V}O_2$ (Jones & Poole, 2005). Teoricamente, tanto o comportamento do $\dot{V}O_2$ durante a cinética *on* como na *off* representariam os mecanismo reguladores do metabolismo celular (Rossiter *et al.*, 2002). Mais especificadamente, a cinética *on* tem recebido destaque como um importante fator associado à aptidão aeróbia (Wells *et al.* 2012), pois indivíduos que apresentam uma cinética *on* mais rápida são capazes de ter uma ativação acelerada do metabolismo aeróbio para o fornecimento de energia (Idström *et al.*, 1985), bem como podem apresentar uma maior tolerância ao esforço (Wells *et al.*, 2012).

As primeiras pesquisas relacionadas à cinética do $\dot{V}O_2$ foram realizadas em meados da década de 1970, onde ocorreu o avanço na tecnologia em espirometria, possibilitando a análise

das trocas gasosas respiração a respiração (Jones & Pole 2005). Entre esses primeiros estudos, destaca-se o trabalho desenvolvido por Whipp e Wasserman (1972) no qual demonstraram que existiam três fases da cinética do $\dot{V}O_2$ durante o esforço. Essa análise temporal do $\dot{V}O_2$ durante o exercício apresenta três fases distintas classificadas como: a) fase 1 – cardiodinâmica: nesta fase o aumento do $\dot{V}O_2$ ocorre devido o aumento do fluxo sanguíneo nos pulmões, não apresentando uma relação com o aumento do débito cardíaco e nem com a utilização de O_2 pela musculatura em atividade (Whipp & Casaburi, 1982); b) fase 2: essa fase representa a utilização de oxigênio pela musculatura esquelética em atividade, representando também a degradação da fosforilcreatina durante o exercício (Bertuzzi & Rumenig-Souza, 2009); c) fase três: representa o possível estado estável do $\dot{V}O_2$ e normalmente costuma ser atingido após o terceiro minuto de atividade (Gaesser & Poole, 1996).

A análise do comportamento da cinética do $\dot{V}O_2$ pode variar de acordo com a intensidade do exercício (Bertuzzi & Rumenig-Souza, 2008). Por esse motivo, a intensidade do esforço vem sendo dividida em quatro domínios (Özyner *et al.*, 2001), a saber: I) domínio moderado: intensidade sub limiar ventilatório; II) domínio pesado: intensidades de esforço entre o limiar ventilatório e o ponto de compensação respiratório, mais precisamente determinado pelo PCR; III) domínio muito pesado: intensidades entre o PCR e a intensidade na qual se atingiu o $\dot{V}O_{2\text{máx}}$ e IV) domínio severo: intensidade supra a intensidade na qual se atingiu o $\dot{V}O_{2\text{máx}}$.

Dessa forma, entendendo que existem diferentes momentos para a análise temporal do $\dot{V}O_2$ e que existem diferentes intensidades do esforço para analisar $\dot{V}O_2$, tem se proposto diferentes modelos matemáticos para a análise da cinética *on* do $\dot{V}O_2$ (Bertuzzi & Rumeing-Souza, 2008). Quando o objetivo é analisar o exercício em intensidade de domínio moderado e severo a modelagem matemática considerada mais apropriada é a monoexponencial (equação 1). No entanto, quando o objetivo é analisar o esforço realizado em intensidade do domínio pesado e muito pesado, a modelagem matemática proposta sugerida é a biexponencial (equação 2) (Özyner *et al.*, 2001). Essa modelagem biexponencial é utilizada para essas duas intensidades do esforço, pois apresenta um rigor matemático mais robusto, visto que nessas duas intensidades do esforço há a presença do componente lento do $\dot{V}O_2$, mas especificamente durante a fase três (Bertuzzi *et al.*, 2013). Vale salientar que essas modelagem mono e biexponencial são realizadas excluindo a fase cardiodinâmica, devido a essa fase não refletir o $\dot{V}O_2$ da musculatura esquelética.

$$\dot{V}O_{2(t)} = \dot{V}O_{2rep} + A_1 \bullet [1 - e^{-(t-\delta)_1/\tau_1}] \quad (\text{Equação 1})$$

$$\dot{V}O_{2(t)} = \dot{V}O_{2rep} + A_1 \bullet [1 - e^{-(t-\delta)_1/\tau_1}] + A_2 \bullet [1 - e^{-(t-\delta)_2/\tau_2}] \quad (\text{Equação 2})$$

$\dot{V}O_{2(t)}$ = consumo de oxigênio no momento t ; $\dot{V}O_{2rep}$ = consumo de oxigênio de repouso; A = amplitude da exponencial; t = tempo em s; δ = tempo de atraso em s; τ = constante de tempo da exponencial em s; os números subscritos $_1$ e $_2$ são referentes aos componentes cinéticos do primeiro e segundo processo exponencial, respectivamente.

Sendo assim, com a análise matemática da cinética *on* do $\dot{V}O_2$ torna-se possível quantificar a constante de tempo (τ), a amplitude da exponencial (A) e também o tempo de atraso (δ). Em uma explicação mais detalhada, pode-se compreender a τ com representativa do tempo necessário para se atingir 63% do valor estável do $\dot{V}O_2$, a A demonstra a magnitude do $\dot{V}O_2$ do início ao fim da exponencial e por sua vez o δ se refere ao tempo que se leva para determinada exponencial ter início (Bertuzzi & Rumenig-Souza 2008) (figura 3). Entre essas três variáveis, a τ tem recebido destaque em relação ao desempenho aeróbio, pois indivíduos mais treinados são capazes de apresentar menores valores na τ quando comparados a fisicamente ativos e a indivíduos com patologias cardíacas (Jones & Poole 2005). Além disso, quando são comparados atletas de velocidade em relação a atletas de resistência, é verificado uma menor τ para atletas de resistência (Berger *et al.*, 2006). Esse efeito seria proveniente de uma maior fosforilação oxidativa e também um maior débito cardíaco no início do exercício que esses indivíduos apresentam.

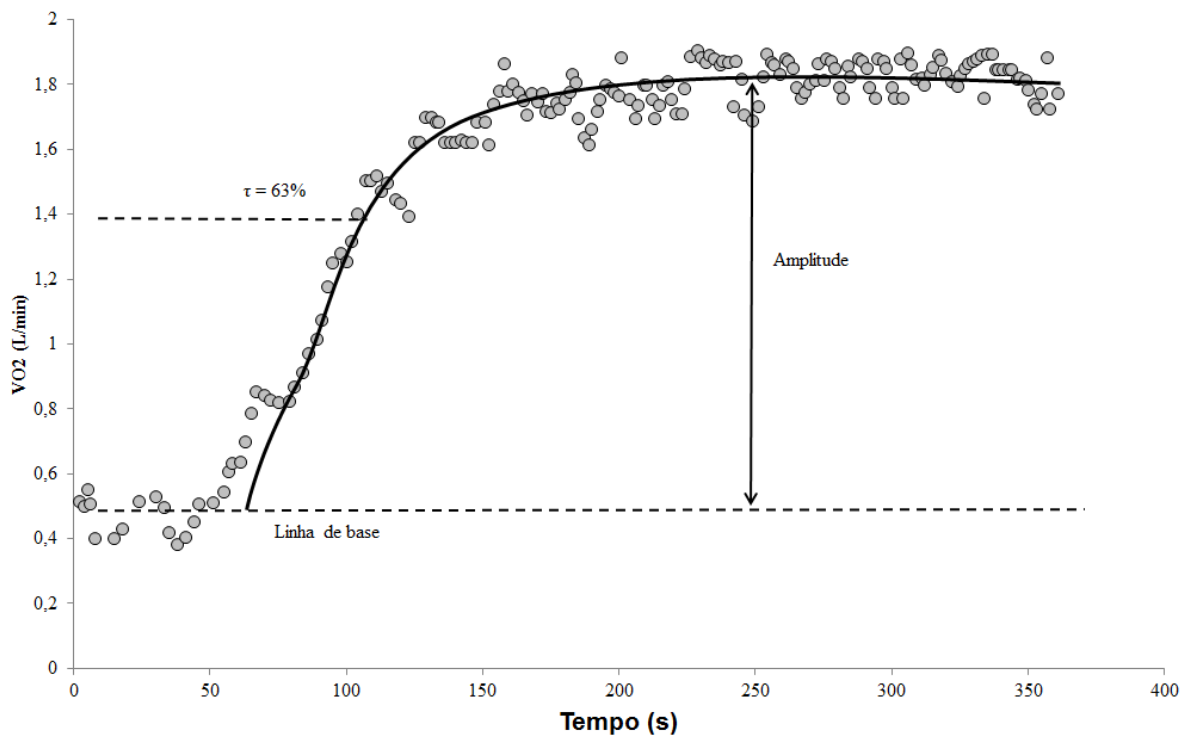


Figura 3. Gráfico da consumo de oxigênio e representação dos componentes da cinética *on*.

Essa importância da cinética *on* tem sido evidenciada também em estudos longitudinais como, por exemplo, Hagberg e Coyle (1984) que identificaram, após nove semanas de treinamento aeróbio, uma diminuição na constante de tempo para mesma carga submáxima de esforço de indivíduos fisicamente ativos. Por sua vez, Phillipis *et al.* (1995), após quatro semanas de treinamento aeróbio, identificaram melhora (diminuição) nos valores da cinética *on*, τ , mas não identificaram modificações nos valores do $\dot{V}O_2$ máx e nos limiares ventilatórios. De forma similar, Kilding *et al.* (2006) identificaram que para corredores de provas de média e longa duração os valores da τ da cinética *on* apresentaram correlações significativas com o volume de treinamento dos corredores, $r = -0,63$, $p = 0,009$ para corredores de média duração e $r = -0,68$, $p = 0,004$ para corredores de longa duração. De forma conjunta, os estudos apresentados acima demonstram a cinética *on*, mais especificamente a τ , como uma variável sensível ao estímulo de treinamento, evidenciando assim sua importância para o desempenho aeróbio.

Dessa forma, conseguimos observar uma relação importante entre a cinética *on* do $\dot{V}O_2$ e o desempenho em corridas de longa duração (Kilding *et al.* 2006). Evidências ainda apresentam que a essa variável seria mais sensível ao estímulo de treinamento do que as mais tradicionalmente utilizadas, como por exemplo no estudo realizado por Phillipis *et al.* (1995), no qual ao comparar os valores da concentração de lactato sanguíneo, do $\dot{V}O_2$ máx, velocidade

pico e da cinética *on* do consumo de oxigênio, após 30 dias de treinamento, evidenciou que as modificações significativas nos valores da cinética *on* foram evidenciadas após quatro dias de treinamento, ao passo que as modificações nos demais variáveis corream somente após esse período (Phillipis *et al.*, 1995). No entanto, devido a complexidade de coleta e análise, as variáveis da cinética *on* não têm sido bem difundida no ambiente prático de treinamento, por esse motivo há uma necessidade de modelos mais simplificados para que ocorra uma maior aplicabilidade dessa variável.

VELOCIDADE PICO EM ESTEIRA

Outra variável que tem se destacado nos últimos 20 anos é a velocidade pico atingida durante um teste incremental realizado em esteira (Vpico) (Noakes *et al.*, 1990). A Vpico é um representativo também dos fatores anaeróbios e neuromusculares que influenciam a corrida de longa duração (Paavolainen *et al.*, 2000), como por exemplo, a maior capacidade de ressintetizar ATP via glicólise anaeróbia, maior ativação neural, maior força e elasticidade muscular (Bosco *et al.*, 1994).

Os primeiros indícios da importância da Vpico para o desempenho em provas de longa duração foram apresentados por Noakes *et al.* (1990), que observaram correlações significativas entre a Vpico e o tempo de prova para maratona ($r = -0,88$) e ultramaratona ($r = -0,94$). Esse resultado foi possível, devido à influência do que eles consideraram como “*muscle power factors*”, que abrangeria aspectos como: atividade dos transportadores intracelulares de cálcio e da miosina ATPase e também o nível de atividade do ciclo das pontes cruzadas (Noakes *et al.* 1990). A partir desses achados fica evidenciado que fatores neuromusculares seriam importantes para o desempenho e que uma variável determinada em teste máximo com a Vpico contribuiria para discriminar as diferenças no desempenho.

A partir desse estudo, mais pesquisas procuraram corroborar esses achados. Por exemplo, Houmard *et al.* (1991) identificaram correlações de $r = -0,79$, entre o tempo de prova de 8 km e a Vpico. De forma semelhante, Scott *et al.* (1994) constataram valores de correlação de $r = -0,97$ entre a Vpico e o tempo de corrida em provas de 5 km. Schabort *et al.* (1999) também identificaram elevados valores de correlação entre $r = -0,84$ para a Vpico em esteira e o tempo de corrida e $r = -0,85$ entre a Vpico e o tempo total da prova. Assim, de maneira conjunta, os estudos apresentados destacam a importância da Vpico para provas de corrida de médias e longas distâncias.

Além das pesquisas com objetivo de evidenciar a importância da Vpico para o desempenho em corrida (Houmard *et al.*, 1991; Noakes *et al.*, 1990; Schabort *et al.*, 1999; Scott

et al., 1994) os estudos em ciência do esporte procuraram identificar diferentes fatores que influenciariam na melhora da V_{pico} (Billat *et al.*, 2003; Mikkola *et al.*, 2011; Talpaine *et al.*, 2010). Por exemplo, Billat *et al.* (2003), aplicaram dois modelos diferentes de treinamento aeróbio, um intervalado de alta intensidade e outro contínuo de longa duração. Após a intervenção identificou-se que grupo submetido ao treinamento intervalado de alta intensidade obteve maiores valores da V_{pico} do que comparado com o grupo que realizou o treinamento contínuo ($p < 0,01$), bem como apresentaram valores mais elevados de correlação de $r = -0,86$ entre o desempenho em prova de 10 km e a V_{pico} .

Por sua vez Mikkola *et al.* (2011) e Talpaine *et al.* (2010) ,evidenciaram melhoras nos valores da V_{pico} para um grupo de corredores experientes e amadores, respectivamente, que realizaram treinamento de força e treinamento de potência ($p < 0,05$). De maneira semelhante foi verificado no estudo de Sedano *et al.* (2013) em que corredores realizaram treinamento de força e verificaram além do aumento na V_{pico} , EC, um aumento no desempenho de 3 km, mas sem alteração no $\dot{V}O_2máx$. Em suma, esses estudos apresentam que melhoras nos fatores neuromusculares resultantes de um período de treinamento de força e/ou potência podem influenciar significativamente nos valores da V_{pico} , contribuindo paralelamente para o desempenho em corrida. Além disso, esses resultados reforçam que uma única variável muitas vezes pode não refletir o desempenho em atividades predominantes do metabolismo aeróbio.

CONCLUSÃO

A partir das evidências apresentadas nessa revisão, podemos compreender que os estudos mais tradicionais utilizaram como padrão para se determinar o desempenho para modalidades de longa duração o $\dot{V}O_2máx$, os limiares ventilatórios e da economia de corrida.. No entanto, pesquisas mais contemporâneas têm adicionado, a análise da cinética *on* do $\dot{V}O_2$ e também a V_{pico} , essa ultima variável como sendo uma das precursoras da importante relação entre fatores neuromusculares e o resultado em corrida de longa duração. Dessa forma, quando o objetivo é determinar o desempenho aeróbio para modalidades de longa duração os estudos têm apresentado que devem ser utilizadas na medida do possível essas variáveis de forma conjunta, para assim conseguir ter uma melhor compreensão do processo do desempenho aeróbio.

REFERÊNCIAS

BASSETT, D.R. JR, HOWLEY. Limiting factors for maximum oxygen uptake and

determinants of endurance performance. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, 32(1), 70-8, 2000.

BERTUZZI, R.C., RUMENIG-SOUZA, E. Resposta cinética do consumo de oxigênio: relação entre metabolismo aeróbio e atp-cp. **Arquivos em Movimento**, 5(1), 99-118, 2009.

BERTUZZI, R.C., NASCIMENTO, E.M., URSO, R.P., DAMASCENO, M., LIMA-SILVA, A.E. Energy system contributions during incremental exercise test. **Journal of Sports Science and Medicine**, 12(3), 454-60, 2013.

BILLAT, V., LEPRETRE, P.M., HEUGAS, A.M., LAURENCE, M.H., SALIM, D., KORALSZTEIN. Training and bioenergetic characteristics in elite male and female Kenyan runners. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, 35(2), 297-304, 2003.

BOSCO, C., MONTANARI, G., RIBACCHI, R., GIOVENALI, P., LATTERI, F., IACHELLI, G., FAINA, M., COLLI, R., DAL MONTE, A., LA ROSA, M. Relationship between the efficiency of muscular work during jumping and the energetics of running. **European Journal Applied Physiology and Occupational Physiology**, 56(2), 138-43, 1987.

CONLEY, D.L., KRAHENBUHL, G.S. Running economy and distance running performance of highly trained athletes. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, 12(5), 357-360, 1980.

COSTILL, D.L. Muscle fiber composition and enzyme activities of elite distance runners. **Medicine and Science Sports**, 8(2), 96-100, 1976.

COYLE, E.F. Integration of the physiological factors determining endurance performance ability. **Exercise and Sport Science Review**, 23, 25-63, 1995.

DANIELS, J., DANIELLS, N. Running economy of elite male and elite female runners. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, 24(4), 483-489, 1992.

DENADAI, B.S. Limiar anaeróbio: considerações fisiológicas e metodológicas. **Revista Brasileira de Atividade Física e Saúde**, 1(2), 74-88, 1995, 1995.

DUBOCHAUD, H., BUTTERFIELD, G.E., WOLFEL, E.E., BERGMAN, B.C., BROOKS, G.A. Endurance training, expression, and physiology of LDH, MCT1, and MCT4 in human skeletal muscle. **American Journal of Physiology and Endocrinological Metabolism**, 278(4), E571-579, 2000.

FARRELL, P.A., WILMORE, J.H., COYLE, E. F., BILLING, J. E., COSTILL, D. L. Plasma lactate accumulation and distance running performance. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, 11(4), 338-344, 1979.

FLETCHER, W. M., HOPKINS, F.G. Lactic acid in amphibian muscle. **Journal Physiology**, 35, 247-309, 1907.

FOSTER, C., LUCIA, A. Running economy: the forgotten factor in elite performance. **Sports Medicine**, 37(4-5), 316-9, 2007.

GAESSER, A.G., POOLE, D.C. The slow component of oxygen uptake kinetics in humans. **Exercise and Sport Science Review**, 24, 35-71, 1996.

GASTIN, P.B. Energy system interaction and relative contribution during maximal exercise. **Sports Medicine**, 31(10), 725-741, 2001.

GOLLNICK, P.D., ARMSTRONG, R.B., SALTIN, B., SAUBERT, C.W 4TH., SEMBROWICH, W.L., SHEPHERD, R.E. Effect of training on enzyme activity and fiber composition of human skeletal muscle. **Journal of Applied Physiology**, 34(1), 107-111, 1973.

GONZALEZ-HARO, C. (2011). Maximal fat oxidation rate and cross-over point with respect to lactate thresholds do not have good agreement. **International Journal of Sports Medicine**, 32 (5), 379-85, 2011.

GRANT, S., CRAIG, I., WILSON, J., AITCHISON, T. The relationship between 3 km running performance and selected physiological variables. **Journal of Sports Science**, 15(4), 403-410, 1997.

HAGBERG, J.M., COYLE, E.F. Physiologic comparison of competitive racewalking and running. **International Journal of Sports Medicine**, 5(2), 74-77, 1984.

HECK, H; MALDER, A., HESS, G., MUCKE, S., MULLER, R., HOLLMAN, W. Justification of the 4-mmol/l lactate threshold. **International Journal of Sports Medicine**, 6(3), 117-130, 1985.

HELGERUD, J., STØREN, O., HOFF, J. Are there differences in running economy at different velocities for well-trained distance runners? **European Applied Physiology**, 108(6), 099-105, 2010.

HILL, A.V., LONG, C.H.N., LUPTON, H. Muscular exercise, lactic acid and the supply and utilisation of oxygen: parts VII–VIII. **Quarterly Journal of Medicine**, 16, 135-171, 1923.

HOLLOSZY, J.O., COYLE, E.F. Adaptations of skeletal muscle to endurance exercise and their metabolic consequences. **Journal of Applied Physiology**, 56(4), 831-8, 1984.

HOUMARD, J.A., CRAIB, M.W., O'BRIEN, K.F., SMITH, L.L., ISRAEL, R.G., WHEELER, W.S. Peak running velocity, submaximal energy expenditure, VO₂max, and 8 km distance running performance. **Journal of Sports Medicine and Physical Fitness**, 31(3), 345-50, 1991.

IDSTRÖM, J.P., SUBRAMANIAN, V.H., CHANCE, B., SCHERSTEN, T., BYLUND-FELLENUS, A.C. Oxygen dependence of energy metabolism in contracting and recovering rat skeletal muscle. **American Journal of Physiology**, 248(1 Pt 2), H40-H48, 1985.

JONES, A. M., POOLE, D. C. Introduction to oxygen uptake kinetics and historical development of the discipline. In: Oxygen uptake kinetics in sport, exercise and medicine. **Abingdon: Routledge**, 2005.

KILDING, A.E., WINTER, E.M., FYSH, M. A comparison of pulmonary oxygen uptake kinetics in middle- and long-distance runners. **International Journal of Sports Medicine**, 27(5), 419-26, 2006.

MARGARIA, R., EDWARDS, H.T., DILL, D.B. The possible mechanisms of contracting and paying the oxygen debt and the role of lactic acid in muscular contraction. **American Journal of Physiology, Bethesda**, 106, 689-715, 1993.

MEYER, T., LUCIA, A., EARNEST, C.P., KINDERMANN, W. (2005). A conceptual framework for performance diagnosis and training prescription from submaximal gas exchange parameters--theory and application. **International Journal of Sports Medicine**, 1, p.S38-48, 2005.

MIKKOLA, J., VESTERINEN, V., TAIPALE, R., CAPOSTAGNO, B., HÄKKINEN, K., NUMMELA, A. Effect of resistance training regimens on treadmill running and neuromuscular performance in recreational endurance runners. **Journal of Sports Science**, 29(13), 1359-71, 2011 .

NOAKES, T.D., MYBURCH, K.H., SCHALL, R. Peak treadmill running velocity during the VO₂ max test predicts running performance. **Journal of Sports Science**, 8(1), 35-45, 1990.

OZYENER, F., ROSSITER, H.B., WARD, S.A., WHIPP, B.J. Influence of exercise intensity on the on- and off-transient kinetics of pulmonary oxygen uptake in humans. **Journal of Physiology**, 15, 891-902, 2001.

PAAVOLAINEN, L.M., NUMMELA, A.T., RUSKO, H.K. Neuromuscular characteristics and muscle power as determinants of 5-km running performance. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, 31(1), 124-130, 1999.

PHILLIPS, S.M., GREEN, H.J., MACDONALD, M.J., HUGHSON, R.L. Progressive effect of endurance training on VO₂ kinetics at the onset of submaximal exercise. **Journal of Applied Physiology**, 79(6), 1914-1920, 1995.

RABADÁN, M., DÍAZ, V., CALDERÓN, F.J., BENITO, P.J., PEINADO, A.B., MAFFULLI, N. Physiological determinants of speciality of elite middle- and long-distance runners. **Journal of Sports Science**, 29(9), 975-82, 2011.

RIBEIRO, J. (1995). Limiares metabólicos e ventilatórios durante o exercício. Aspectos fisiológicos e metabólicos. Physiological and methodological aspects. **Arquivos brasileiros de Cardiologia**, 64(2), 171-181, 1995.

ROBINSON, S., EDWARDS, H.T., DILL, D.B. New records in human power. *Science*, 85, 409-410, 1937.

ROSSITER, H.B., WARD, S.A., KOWALCHUK, J.M., HOWE, F.A., GRIFFITHS, J.R., WHIPP, B.J. Dynamic asymmetry of phosphocreatine concentration and O₂ uptake between the on- and off-transients of moderate- and high-intensity exercise in humans. **The Journal of Physiology**, 15(541.3), 991-1002, 2002.

SALTIN, B., ASTRAND, P.O. Maximal oxygen uptake in athletes. **Journal of Applied Physiology**, 23(33), 353-358, 1967.

SAUNDERS, P.U., PYNE, D.B., TELFORD, R.D., HAWLEY, J.A. Factors affecting running economy in trained distance runners. **Sports Medicine**, 34(7), 465-485, 2004.

SCHABORT, E.J., KILLIAN, S.C., ST CLAIR GIBSON, A., HAWLEY, J.A., NOAKES, T.D. Prediction of triathlon race time from laboratory testing in national triathletes. **Medicine and Science in Sport and Exercise**, 32(4), 844-9, 2000.

SCOTT, B.K., HOUMARD, J.A. Peak running velocity is highly related to distance running performance. **International Journal of Sports Medicine**, 15(8), 504-507, 1994.

SEDANO, S., MARÍN, P.J., CUADRADO, G., REDONDO, J.C. Concurrent training in elite male runners: the influence of strength versus muscular endurance training on performance outcomes. **Journal of Strength and Conditional Research**, 27(9), 2433-43, 2013.

SJÖDIN, B., SVENDENHAG, J. Applied physiology of marathon running. *Sports Medicine*, 2(2), 83-99, 1985.

WASSERMAN, K., MCLORY, M.B. Detecting the threshold of anaerobic metabolism. **American Journal of Cardiology**, 44, 884-852, 1964.

WELLS, C.M., EDWARDS, A.M., WINTER, E.M., FYSH, M.L., DRUST, B. Sport-specific fitness testing differentiates professional from amateur soccer players where VO₂max and VO₂ kinetics do not. **Journal of Sports Medicine and Physical Fitness**, 52(3), 245-54, 2012.

WHIPP, B.J., WASSERMAN, K. Oxygen uptake kinetics for various intensities of constant-load work. **Journal of Applied Physiology**, Bethesda, 33(3), 351-356, 1972.

<p>Contato dos autores: salomao.silva@usp.br nilookuno@yahoo.com.br limasilvae@hotmail.com bertuzzi@usp.br</p>	<p>Submetido em 08/08/2014</p> <p>Aprovado em 19/ 05/2015</p>
--	---