

Artigo Original

Determinação da potência mecânica no limite entre os domínios pesado/severo do crawl-atado

Dalton Müller Pessôa Filho^{1,2}
Benedito Sérgio Denadai¹

¹*Laboratório de Avaliação da Performance Humana, Instituto de Biociências. UNESP, Univ Estadual Paulista, Campus de Rio Claro, Departamento de Educação Física, Rio Claro, SP, Brasil*

²*Faculdade de Ciências. UNESP - Univ Estadual Paulista, Campus de Rio Claro, Departamento de Educação Física, Bauru, SP, Brasil*

Resumo: O objetivo deste estudo foi ajustar o modelo $P-t_{Lim}$ à natação com o recurso do nado atado. Seu significado fisiológico para a descrição dos domínios pesado/severo foi obtido pelas relações com a velocidade crítica (VC), potência crítica (PC) e com máxima fase estável do lactato (MFEL). A velocidade correspondente a MFEL ($v_{MFEL} = 1,17 \pm 0,11$ m/s) e a VC ($1,19 \pm 0,12$ m/s) obtidas durante o nado desimpedido foram significativamente diferentes. Similarmente, a potência correspondente a MFEL ($p_{MFEL} = 89,2 \pm 15,1$ W) e a PC ($99,4 \pm 22,9$ W) foram diferentes durante o nado atado. Não houve diferença da concentração de lactato na v_{MFEL} ($3,54 \pm 0,9$ mM) e p_{MFEL} ($3,76 \pm 0,6$ mM). Coeficientes de Pearson significativos ($r > 0,70$) foram observados entre os parâmetros v_{MFEL} e p_{MFEL} com seus respectivos pares do modelo tempo-limite. Assim, o nado atado parece ser válido para determinar os limites do domínio pesado/severo, podendo também ser utilizado para avaliar a capacidade aeróbia de nadadores.

Palavras-chave: Nado crawl. Potência crítica. Velocidade crítica. Máxima fase estável do lactato.

Measurement of mechanical power on the boundary of heavy/severe domain in the tethered-crawl

Abstract: The aim of this study was to access the $P-t_{Lim}$ model in swimming, applying the load control available in full tethered swim condition. Its physiological meaning for the determination of boundary of heavy/severe domains was assessed from the relationships with critical velocity (CV), critical power (CP) and maximal lactate steady state (MLSS). The velocity at MLSS ($v_{MLSS} = 1.17 \pm 0.11$ m/s) and CV (1.19 ± 0.12 m/s) were significantly different. Similarly, the power at MLSS ($p_{MFEL} = 89.2 \pm 15.1$ W) and CP (99.4 ± 22.9 W) were significantly different. There was no difference between lactate concentration at v_{MLSS} (3.54 ± 0.9 mM) and p_{MLSS} (3.76 ± 0.6 mM). Significant Pearson's coefficients ($r > 0.70$) were observed among v_{MLSS} and p_{MLSS} with their respective values on time-limited model. Thus, the tethered-crawl condition seems to be valid to determine the boundary of heavy/severe domains, and to access the aerobic capacity of swimmers.

Key Words: Front-crawl swim style. Critical power. Critical velocity. Maximal lactate steady-state.

Introdução

Pontos de demarcação para comportamentos metabólicos distintos representam limites dos diferentes domínios de intensidade de exercício, que são descritos pela parcela de contribuição das diferentes fontes metabólicas à demanda energética da atividade (HILL *et al.*, 2002), pela taxa de ajuste das vias (WARD-SMITH, 1999), limites temporais do desempenho (FAINA *et al.*, 1997; MORTON; BILLAT, 2000) e pela cinética da concentração de lactato sanguíneo (SMITH; JONES, 2001). Os limites destes domínios têm servido aos propósitos de diagnóstico do desempenho, monitoramento da evolução do treinamento e prescrição do treinamento em conformidade à especificidade de seu requerimento energético (JONES; CARTER, 2000).

Hill *et al.* (2002) demonstraram que além dos domínios moderado, pesado e severo, tradicionalmente descritos, haveria um quarto domínio, o extremo. Descrições fisiológicas destes domínios estão circunscritas pela cinética do consumo pulmonar de oxigênio (VO_2). Define-se como exercício moderado aquele realizado abaixo do limiar de lactato (LL), que proporciona um aumento rápido com ajuste mono-exponencial do VO_2 até a sua estabilidade (fase estável) dentro de 2-3min; enquanto o exercício pesado (acima do LL) apresenta um componente lento da resposta do VO_2 , que se superpõe ao aumento rápido inicial e conduz tardiamente à estabilidade, ou aumenta progressiva e lentamente até o final do exercício (BURNLEY *et al.*, 2001; BARSTOW *et al.*, 1996; SAHLIN, *et al.*, 2005); o exercício severo é o único caracterizado pela indução à

potência aeróbia máxima (VO_{2max}), que pode ser sustentado por volta de 10 minutos (BILLAT; KORALSZTEIN, 1996), sendo o VO_2 é projetado exponencialmente ao seu valor máximo e a concentração de lactato sanguíneo aumentada abruptamente até a exaustão ocorrer (SMITH; JONES, 2001); o domínio extremo do exercício está associado ao surgimento da exaustão antes que o VO_{2max} possa ser alcançado (HILL, *et al.*, 2002; CAPUTO; DENADAI, 2008).

Isto sugere que o tempo limite do exercício até a exaustão (t_{lim}) depende da relação linear entre a velocidade (BILLAT *et al.*, 2000) e a potência fisiológica (HILL *et al.*, 2002) capaz de induzir ao VO_{2max} . Há, portanto, um domínio da intensidade delimitado pela velocidade ou potência fisiológica abaixo da qual o VO_2 tende a estabilizar antes de atingir o máximo, ou acima da qual o tempo de exercício é curto o suficiente para conduzir o VO_2 ao seu máximo (BILLAT *et al.*, 2000; HILL *et al.*, 2002). O limite mínimo tem sido demarcado pela velocidade crítica (VC – derivada da relação não linear entre distância e tempo de exaustão, que é análoga à relação potência e tempo de exaustão – potência crítica, PC) (BILLAT *et al.*, 1999; BILLAT *et al.*, 2000), ou potência fisiológica crítica (PC_f – derivada da relação entre VO_2 e tempo para atingir o VO_{2max} , que também é análoga à relação potência e tempo de exaustão) (HILL *et al.*, 2002). Em exercícios com intensidade acima da PC, o suprimento aeróbio de energia não se estabilizaria, ao contrário tende a manifestar um aumento gradual do VO_2 que atingirá o VO_{2max} , em diferentes tempos de respostas (τ) (HILL *et al.*, 2002). Isso sugere que as fontes anaeróbias não suprem sozinhas a demanda de energia em intensidade acima da PC (MORTON, 2006). A definição de um ponto limítrofe máximo não apresenta um consenso, enquanto Billat *et al.* (2000) sugerem não ser diferente da velocidade correspondente a 100% do VO_{2max} (vVO_{2max}), Hill, *et al.* (2002) definiram este ponto em uma potência a 136% daquela observada no VO_{2max} .

Suporte teórico que indica PC, ou VC, como a demarcação entre os domínios pesado e severo são contraditórios devido à variabilidade entre as estimativas deste índice. De qualquer forma, alguns autores (CARTER *et al.*, 2002; HOUSH *et al.*, 1991) denominam PC como limiar de fadiga, reportando ser este índice correspondente a 41% da diferença entre o VO_2 no LL e o VO_{2max} ($\Delta VO_{2LL-VO_{2max}}$), o que identifica a fronteira entre os domínios pesado e severo do exercício. Estudos têm examinado as respostas de parâmetros fisiológicos, como frequência cardíaca (FC) e VO_2 em intensidade correspondente à VC. Bull *et al.* (2007) reportaram variações entre 92 a 96% da FC_{max} (frequência cardíaca máxima) e de 76-90% do VO_{2max} neste índice, enquanto o tempo de exaustão não foi superior à 30-40 min, apresentando ao final uma concentração de lactato no sangue em torno de 8-10 mmol/L (DEKERLE, 2006).

Por isso, a máxima fase estável da concentração do lactato sanguíneo (MFEL) tem sido proposta, ao invés de PC ou VC, como o limite entre os domínios pesado e severo do exercício (PRINGLE; JONES, 2002). A MFEL é determinada pela intensidade sustentável (carga ou velocidade) em que a concentração de lactato atinge sua fase estável máxima ao longo do exercício (BENEKE, 2003), bem como é também considerada a intensidade limítrofe para a estabilidade do VO_2 e ponto de alteração do tipo de substrato, predominantemente, empregado na produção energética pela via oxidativa (BILLAT *et al.*, 2003). A importância fisiológica de MFEL está em demarcar a intensidade do exercício acima da qual a contribuição do metabolismo anaeróbio começaria contribuir para a ressíntese de ATP demandada pelo exercício (PRINGLE; JONES, 2002).

Há, no entanto, resultados sugerindo que VC e MFEL representariam, muito provavelmente, o mesmo fenômeno fisiológico, ou uma atenuada diferença pelas similaridades na resposta da cinética do lactato durante exercícios realizados em VC (ou PC) e ao seu redor (pouco abaixo e pouco acima) (HOUSH *et al.*, 1991; WAKAYOSHI *et al.*, 1993; SMITH; JONES, 2001). Assim, VC (ou PC) demarcaria a transição entre os domínios pesado e severo do exercício, fornecendo uma estimativa não invasiva da MFEL, ao considerar o ponto limítrofe entre estes domínios como a intensidade que possibilitaria a máxima estabilidade da concentração de lactato e da resposta do VO_2 durante exercícios prolongados (JONES; DOUST, 1998).

Os pontos de concordância e discordância em torno do perfil fisiológico do exercício nas intensidades respectivas a MFEL e VC (ou PC), ou em torno delas, convergem para alguns pontos de consenso: (1) assegurar o controle das condições de avaliação destes índices para a obtenção de valores precisos (SMITH; JONES, 2001); e (2) estabelecer hipóteses fisiológicas com limites suficientemente estreitos e determinantes plausíveis da tolerância ao exercício dentro destes limites (WHIPP *et al.*, 2005). Caso contrário, a distinção entre estes dois índices se restringiria às evidentes limitações metodológicas. Alguns princípios assumidos por ambos os parâmetros são insustentáveis em alguns tipos de exercício. A estabilidade das respostas fisiológicas em intensidades constantes do exercício, como previsto nos protocolos de determinação de MFEL e VC (ou PC), são consideradas em condições (a) independência entre a velocidade e o custo de transporte (economia de movimento); (b) manutenção de uma mesma taxa de conversão da energia fisiológica em mecânica (eficiência mecânica); (c) engajamento de uma mesma quantidade de massa muscular ao longo do exercício em uma mesma intensidade; e (d) suprimento energético realizado, predominantemente, pela

glicólise/glicogenólise e oxidação do piruvato (BENEKE, 2003; MORTON, 2006). O ciclismo e a natação são esportes em que, evidentemente, estes critérios não são integralmente atendidos (PRINLE; JONES, 2002; TOUSSAINT *et al.*, 1998).

Na natação, em particular, a viabilidade do modelo $P-t_{Lim}$ foi suportada por Toussaint *et al.* (1998), demonstrando a linearidade entre d_{Lim} e t_{Lim} e entre custo energético e t_{Lim} . Contudo, como o custo energético na natação depende da velocidade ao cubo, da eficiência mecânica bruta e da eficiência propulsiva ($E = (A \times v^3)/(e_b \times e_p)$), onde " $A \times v^3$ " é a potência mecânica útil à propulsão – P_o), que não são constantes na natação, o modelo $P-t_{Lim}$ se depara com restrições conceituais e metodológicas, concernentes à pressuposição da estabilidade da eficiência mecânica e à quantificação da variável potência mecânica ao longo de uma faixa de velocidade (PESSÔA FILHO; DENADAI, 2008). O parâmetro PC foi estimado por Pessôa Filho; Denadai (2008) e Pessôa Filho *et al.* (2008) empregando a força de arrasto ativo ($F_{r_{max}}$) como parâmetro de carga no nado-atado, que é considerado um ergômetro específico para simular as condições desimpedidas de nado, além de configurar um ambiente que proporciona uma melhor distribuição da força e da velocidade da mão durante o ciclo da braçada (VORONTSOV *et al.*, 2006; ROUARD *et al.*, 2006). Desta forma, o modelo de PC pode ser reproduzido na natação, mas sua proximidade com índices da capacidade aeróbia ainda está por ser determinada e, assim, melhor definir o papel deste índice (PESSÔA FILHO; DENADAI, 2008).

Seguindo a recomendação destes autores, o presente estudo se propõe a apresentar (a) uma revisão geral dos procedimentos de modelagem da relação distância-tempo limite ($d_{Lim}-t_{Lim}$), potência tempo limite ($P-t_{Lim}$) e MFEL, bem como (b) discutir a confluência entre os parâmetros VC (ou PC) e MFEL na delimitação entre os domínios pesado e severo do exercício, e (c) apresentar a influência da mecânica de nado na determinação de PC e MFEL.

O modelo potência/tempo limite ($P-t_{Lim}$):

Monod; Scherrer (1965) demonstraram que a taxa de força muscular apresenta uma relação hiperbólica com o tempo de exaustão, a qual fora, posteriormente, analisada e verificada por Moritani *et al.* (1981), para o exercício em cicloergômetro. Modelar a capacidade de trabalho pelo tempo de exaustão presume que o sistema é composto por dois compartimentos de suprimento da demanda energética, o aeróbio e o anaeróbio (MORTON, 2006). Segundo este autor, o índice do fornecimento aeróbio de energia é ilimitado em capacidade, mas limitado quanto à taxa de fornecimento, tendo a potência crítica (PC) como parâmetro limítrofe e sendo o tempo de exaustão

em intensidades até CP infinitamente longo. A partir da CP, a participação aeróbia se estabilizaria demandando a participação anaeróbia, que por sua vez, é considerada limitada em sua capacidade e ilimitada em sua taxa temporal de fornecimento, sendo delimitada pela capacidade de trabalho anaeróbio (CTA) (MORTON, 2006). Esse modelo de dois compartimentos é traçado a partir da regressão entre potência mecânica e tempo de exaustão, fornecendo, segundo Bull *et al.* (2000):

$$P \times t = CTA + PC \times t \quad (1)$$

que, obedecendo à equação da reta, sugere que o intercepto retrata a CTA e que a inclinação expressa a PC, sendo ambos, portanto, constantes (BULL *et al.*, 2000; MORTON, 2006). A resolução da Equação 1 para o tempo (t), fornece:

$$t = \frac{CTA}{P - PC} \quad (2)$$

onde "P" é a potência mecânica empregada como intensidade do exercício e "t" é o tempo de exaustão, o que presume que $t \rightarrow \infty$ quando $P \rightarrow 0$, ou ainda que $P \rightarrow \infty$ se $t \rightarrow 0$, e que a exaustão ocorrerá quando $CTA = 0$ (BULL *et al.*, 2000; MORTON, 2006).

Pela perspectiva de que a potência mecânica é uma grandeza dependente do tempo, quando $t \rightarrow 0$, a potência mecânica tende a ser nula. Assim, o pressuposto de que a potência seria infinita para $t \rightarrow 0$ assumida pelo modelo não linear de 2-parâmetros (Equação 2) para a relação entre potência e tempo de exaustão, não se sustenta. Ainda, presumir que em velocidades até a potência crítica (PC) o tempo de exaustão tende ao infinito e que acima de PC a fadiga é determinada pelo esgotamento da capacidade de trabalho anaeróbio (CTA), não condiz com os postulados fisiológicos que descrevem a exaustão, durante exercícios com estabilidade metabólica, como sendo proporcionada por fatores de controle da atividade contrátil, psicológicos e pelos limites das reservas de substratos (SMITH; JONES, 2001; MORTON, 2006). Alternativamente, Morton (1996) propôs uma reformulação para um modelo de 3-parâmetros, ajustando o antigo pressuposto, $PC < P < \infty$, para $PC < P \leq P_{máx}$ (MORTON, 1996; MORTON, 2006), assumindo, segundo Bull *et al.* (2000), que se $t = k$ e $P = P_{máx}$ quando $t \rightarrow 0$, então:

$$k = -\left(\frac{CTA}{(P_{m\acute{a}x} - PC)}\right) \quad (3)$$

que, associada à Equação 2, forneceria:

$$t = \left(\frac{CTA}{P - PC}\right) - \left(\frac{CTA}{P_{m\acute{a}x} - CP}\right) \quad (4)$$

sendo “ $P_{m\acute{a}x}$ ” o valor do intercepto no eixo da potência, quando $t = 0$.

Além destes modelos, a relação entre potência e tempo pode, de acordo com Gaesser *et al.* (1995), ser representada de forma linear, sendo:

$$P = \left(\frac{CTA}{t}\right) + PC \quad (5)$$

onde a “CTA” é caracterizada pela inclinação e “PC” é o intercepto. Ainda, a descrição deste modelo de forma exponencial tem possibilitado um melhor ajuste entre os dados em intensidades em que o tempo limite do exercício é menor do que três minutos (GAESSER *et al.*, 1995; BULL *et al.*, 2000 e MORTON, 2006). A função “ $\exp(-t/\tau)$ ” atende à cinética mono exponencial apresentada pela contribuição aeróbia ao início da atividade até sua estabilização, ou valor máximo, em um intervalo de “ t ” entre 0 e 1 (WARD-SMITH, 1999; MORTON, 2006). Assim:

$$P = PC + (P_{m\acute{a}x} - PC) \times (e^{-t/\tau}) \quad (6)$$

A comparação entre estes modelos apresentou diferenças significativas entre os valores de PC (em watts), sendo o menor valor apresentado pelo modelo de 3-componentes e o maior pelo modelo exponencial. Quando os valores de PC são comparados aos valores do limiar ventilatório para exercícios de longa duração (caracterizado como a maior intensidade que pode ser sustentada por 40 minutos sem aumento da ventilação ente o 20º e o 40º minuto), apenas o valor fornecido pelo modelo de 3-parâmetros não apresentava diferença significativa (GAESSER *et al.*, 1995; BULL *et al.*, 2000). Bull *et al.* (2000) reproduziram a proposta destes últimos autores e chegaram a mesma conclusão, complementando que diversas outras referências compararam PC a outros índices da capacidade aeróbia, como OBLA (início do acúmulo sangüíneo de lactato) e o IAT (limiar anaeróbio individual), demonstrando ausência de diferenças significativas. Isso torna o intercepto fornecido pelo modelo de 3-parâmetros aquele que melhor atende ao significado de PC na relação entre potência e tempo limite:

intensidade que pode ser mantida por tempo infinitamente longo (GAESSER *et al.*, 1995; MORTON, 2006).

A capacidade de trabalho anaeróbia (CTA), que tem sido associada aos índices do rendimento anaeróbio, mostrou-se compatível com o déficit máximo acumulado de oxigênio (MAOD), cerca de 72mlO₂/kg, quando quantificada pelo modelo de 2-parâmetros, cerca de ~29kJ (assumindo 20,9J/mlO₂) (GAESSER *et al.*, 1995). Enquanto que os modelos lineares e exponenciais subestimaram a CTA, o modelo de 3-parâmetros superestimou em mais de 50%. No entanto, ao considerar o balanço entre os metabolismos em suas inter-relações ao longo do tempo, que se constitui em uma das principais críticas à participação independente presumida pelo modelo de 2-parâmetros, verifica-se que a participação anaeróbia em eventos de longa duração (+1h) pode alcançar até 1% e tende a aumentar ao longo do tempo, podendo acumular ~43kJ, o que quase duplica a capacidade anaeróbia prevista pelo MAOD e torna o valor fornecido pelo modelo de 3-parâmetros menos irreal (GAESSER *et al.*, 1995). Apenas o modelo de 3-parâmetros pressupõe a participação parcial desta “reserva energética” e, assim, admite que a exaustão poderia ocorrer antes do esgotamento desta “reserva” (MORTON, 2006; 1996). Essas considerações tornam o modelo de 3-parâmetros mais propício para modelar a relação entre potência e tempo (de exaustão) limite, porém, há uma regra fundamental nos modelos de regressão: o modelo adequado é aquele que se ajusta ao tipo de comportamento entre as variáveis.

O modelo velocidade ou distância/tempo limite ($v-t_{Lim}$, ou $d_{Lim}-t_{Lim}$):

Na teoria, qualquer modalidade de exercício em que o trabalho físico possa ser determinado, ou que envolva alguma forma de locomoção, oferece um campo de aplicação do conceito de PC (MORTON, 2006). Desta forma, parece atrativo, em termos práticos, valer-se da relação entre distância e tempo de locomoção para compor o modelo de desempenho baseado em dois componentes de suprimento energético (BILLAT *et al.*, 1999). Para tanto, o tempo limite pode ser relacionado à distância limite em uma equação análoga à relação entre potência e tempo limite:

$$d_{Lim} = a + b \times t_{Lim} \quad (7)$$

considerando, na equação 7, $d_{Lim} = v \times t_{Lim}$, a equação 7 pode ser rearranjada para “ v ”, fornecendo:

$$v = \left(a \times \frac{1}{t_{Lim}} \right) + b \quad (8)$$

onde “a” é o intercepto em y e definido como a capacidade anaeróbia em unidade de distância; e “b” é a inclinação que quando $t \rightarrow \infty$, $a/t_{Lim} \rightarrow 0$ e $v \rightarrow b$. O intercepto representa a distância percorrida as expensas do metabolismo anaeróbio (DAP). No caso da natação, por exemplo, seria designada como distância anaeróbia de nado (DAN). A inclinação significa a velocidade mantida na máxima fração sustentável do metabolismo aeróbio (velocidade crítica, VC) (BULL *et al.*, 2007; DiPRAMPERO *et al.*, 2007).

Modelagens não lineares da VC, baseando-se na relação hiperbólica entre velocidade e tempo de exaustão são:

$$t = \left(\frac{DAP}{v - VC} \right) \quad (9)$$

A equação 9 é descrita como não-linear de 2-parâmetros, que foi obtida pela equação 8 resolvida para o tempo (t) (BULL *et al.*, 2007). Na equação 10, um parâmetro de velocidade máxima (v_{max}) é inserido, analogamente aos pressupostos assumidos pela Equação 4, compondo o modelo não-linear de 3-parâmetros para a relação distância ou velocidade/tempo limite. Assim, quanto $t \rightarrow 0$, $v \rightarrow v_{max}$:

$$t = \left[\frac{DAP}{v - VC} \right] - \left[\frac{DAP}{v_{max} - VC} \right] \quad (10)$$

O ajuste exponencial para VC segue os mesmos princípios da Equação 6, obtendo:

onde “ τ ” é uma constante de tempo.

$$v = VC + (v_{max} - VC) \times \left(e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (11)$$

Os diferentes ajustes na estimativa de VC fornecem valores com diferenças de 18 a 24% para locomoções terrestres (BULL *et al.*, 2000, BULL *et al.*, 2007). Na natação, as diferenças ainda não foram reportadas. Na estimativa de VC, os valores mais elevados foram fornecidos pelo ajuste exponencial, enquanto que o ajuste pela equação não-linear de 3-parâmetros fornece o valor mais baixo de VC dentre as possibilidades de ajuste. A análise da resposta do VO_2 em testes conduzidos até a exaustão na velocidade correspondente a VC, fornecida por cada equação de ajuste, mostrou aumentos variando 824

entre 367-458 mLO_2/min , que diferem do aumento padrão do VO_2 de 200 mLO_2/min referente ao “drift de O_2 ”¹, e que sugerem, portanto, a ocorrência de um componente lento do VO_2 ao se exercitar em VC (BULL *et al.*, 2007).

Testes em VC suportaram sua validade enquanto índice representativo do desempenho de longa duração e seu significado fisiológico relacionado à intensidade correspondente à estabilidade de diferentes parâmetros metabólicos na natação (WAKAYOSHI *et al.*, 1993; TOUSSAINT *et al.*, 1998; DEKERLE *et al.*, 2002) e na corrida (HILL; FERGUSON, 1999; BILLAT *et al.*, 1999; MORTON; BILLAT, 2000; SMITH; JONES, 2001).

Apesar de VC ser definida, teoricamente, como a intensidade de esforço que pode ser mantida indefinidamente, Dekerle (2006) aponta que esta definição é uma equivocada interpretação da capacidade de sustentar o exercício por longo período de tempo em VC. Alguns aspectos relevantes sobre VC são descritos por esta autora:

- a) na natação, VC demonstra ser um bom indicador da capacidade do sistema aeróbio de energia, uma vez que se apresenta próxima à velocidade do teste de 30 minutos e altamente correlacionada com a MFEL, com a velocidade média nos 400 metros e com o OBLA (ponto que demarca o início do acúmulo de lactato no sangue);
- b) na natação e em outros esportes, os valores de VC são maiores que aqueles observados para os índices MFEL e OBLA, mas inferiores aquele obtido ao final de um teste incremental, frequentemente identificado como velocidade aeróbia máxima (vVO_{2max});
- c) o tempo de exaustão em VC tem previsão em torno de 30-40 minutos, o que se aproxima daqueles observado na MFEL;
- d) VC pode ser considerada o limite superior do domínio pesado do exercício (a maior intensidade do exercício que não induz ao VO_{2max} em intensidade constante) e, assim, conduz a adaptação central e periférica nos sistemas cárdio-circulatório e respiratório com exercícios realizados em torno dela.

Máxima fase estável do lactato sanguíneo (MFEL)

Para Poole *et al.* (1988), o exercício realizado até a MFEL apresenta, como resposta fisiológica, elevação do VO_2 e das concentrações de lactato

¹ Aumento do VO_2 de ~200 mLO_2/min observado no domínio moderado, tipicamente após uma hora ou mais de exercício, propiciado pelo aumento do trabalho ventilatório e cardíaco devido ao aumento da temperatura muscular e corporal e, assim, alteração da curva de dissociação do complexo oxihemoglobina (GAESSER; POOLE, 1996).

e íons H^+ , que ainda podem ser mantidas estáveis. Em exercícios acima da MFEL, ocorre aumento contínuo da concentração de lactato, ventilação pulmonar e do VO_2 , o qual pode ser conduzido ao seu valor máximo (VO_{2max}), caso a exaustão não aconteça antes. A concentração média do lactato na MFEL (4 mM) tende a ser atingida entre 2 a 7 minutos, dependendo do incremento de carga (em um teste progressivo, ou constante), massa muscular primariamente engajada na atividade e padrão motor da atividade, que possivelmente são fatores responsáveis pela alta variabilidade da concentração estável máxima entre indivíduos (2 – 8 mM) (JONES; DOUST, 1998; BENEKE *et al.*, 2000; SMITH; JONES, 2001; BILLAT *et al.*, 2003; PRINGLE; JONES, 2002; SMERKAL *et al.*, 2002; BENEKE, 2003).

A MFEL não é um parâmetro de sobrecarga de trabalho, mas de intensidade do exercício acima da qual o metabolismo altera-se qualitativamente (BENEKE *et al.*, 2000). Assim, ao se exercitar na MFEL, a exaustão ocorrerá pela inabilidade em fornecer energia, via glicogenólise, suficiente para atender a demanda contrátil dos músculos, ou seja, pela limitação das reservas de glicogênio, ao invés da perturbação da homeostase intracelular causada pelo acúmulo de íons H^+ (BENEKE, 2003). Por isso, sua avaliação em uma faixa de intensidade submáxima atende melhor aos propósitos de monitoramento das adaptações fisiológicas decorrentes de um programa de treinamento aeróbio, em relação ao seu uso como preditor do desempenho (JONES; DOUST, 1998). De fato, a intensidade correspondente à MFEL (velocidade – v-MFEL, ou carga – c-MFEL) é considerada o padrão de referência para a determinação da capacidade aeróbia e suas relações com demais índices representativos de limiares de respostas fisiológicas obtidos em testes incrementais, como as velocidades respectivas (a) ao início do acúmulo do lactato no sangue (v-OBLA, $r = 0,82 - 0,93$), a (b) ao ponto de incremento do lactato acima dos valores de repouso (LL, $r = 0,94$); (c) ao incremento do equivalente ventilatório para o VO_2 (VE/VO_2) (VT1, $r = 0,71$); e (d) ao incremento do equivalente ventilatório para o VCO_2 (VE/VCO_2) (VT2, $r = 0,65 - 0,77$) (JONES; DOUST, 1998; SMITH; JONES, 2001; BENEKE, 2003; DEKERLE *et al.*, 2003). Por outro lado, as correlações apresentadas por VC (ou PC) e pelo limiar anaeróbio individual (IAT) com a MFEL tem-se mostrado, contraditoriamente, em níveis bons (0,95 e 0,81, respectivamente) (BENEKE, 2003; PRINGLE; JONES, 2002) e ruins (0,41 e 0,61, respectivamente) (DEKERLE *et al.*, 2003; JONES; DOUST, 1998).

Os critérios de determinação da MFEL oferecem uma razoável fonte de erro entre os diferentes estudos. A definição de MFEL comumente empregada é a intensidade máxima do exercício produzindo uma concentração de

lactato $\leq 1,0$ mM entre o 10º e 30º de um teste com intensidade constante (JONES; DOUST, 1998). Porém, a modulação da concentração de lactato no sangue resulta da interação entre vários fatores inerentes à intensidade e volume do exercício, como a taxa de ativação da glicólise, tamanho da reserva de glicogênio, volume de distribuição do lactato pelos compartimentos de água no corpo, mecanismos de transporte ativo/passivo do lactato pelos compartimentos, disponibilidade de O_2 nos tecidos, nível de treinamento e massa muscular primariamente engajada na atividade (BENEKE, 2003; BILLAT *et al.*, 2003; BARON *et al.*, 2007). Esses fatores explicam a variabilidade na concentração de lactato respectiva à MFEL entre indivíduos e entre os tipos de exercício (BENEKE, 2003).

Mas, dentre estes moduladores, a magnitude da influência da quantidade de massa muscular engajada na atividade se sobressai, preconizando que a intensidade do exercício determina a resposta do lactato, conforme:

$$La(t) = La_{rep} + \Delta La \times [1 - e^{-(k_2 \times t)}] \quad (12)$$

onde $La(t)$ é a concentração do lactato no instante t ; ΔLa é o aumento do lactato no sangue (diferença entre produção e remoção); e K_2 é a constante de tempo para o aumento da concentração ($=1/\tau$ por minuto) (BILLAT *et al.*, 2003). Se K_2 é sugerida como um fator preponderante no nível máximo em que o lactato sanguíneo estabiliza, e se a taxa de produção do lactato é medida em $mmol \times min^{-1} \times kg^{-1}$, então, MFEL é o resultado específico da relação entre potência metabólica e mecânica (BENEKE *et al.*, 2001). De fato, a relação linear entre produção energética (demandada em uma dada intensidade submáxima do exercício) e a potência mecânica total gerada por unidade de massa muscular tem sido demonstrada em diferentes tipos de esportes (KANEKO, 1990; TOUSSAINT, 1990). Assim, para uma dada quantidade de potência mecânica, menor é a intensidade de ativação das fibras musculares quanto maior a massa muscular engajada na atividade e, conseqüentemente, uma menor taxa de incremento do lactato pela redução da ativação da glicólise e maior disponibilidade de O_2 para a oxidação do piruvato (BENEKE *et al.*, 2001; BENEKE, 2003).

Essa tendência também pode ser observada ao considerar a influência da eficiência mecânica (e_{mec}) sobre a demanda energética e a produção de potência mecânica pelos músculos. A interdependência entre energia total demandada (E_{Total}), eficiência mecânica (e_{mec}), potência muscular (P_o) e desempenho (v) é estabelecida, conforme Pendergast *et al.* (2006), por:

$$v = \frac{E_{Total}}{Po / e_{mec}} \quad (13)$$

A equação 13 sugere que uma maior eficiência mecânica demanda um menor trabalho muscular para atender às exigências motoras do desempenho, assim, modulando a estabilidade entre produção e remoção do lactato (BENEKE, 2003). Para Pessoa Filho *et al.* (2008), a análise da eficiência total do desempenho (e_{mec}) aparece como um parâmetro integrador da organização motora e muscular na tarefa, ou seja, um índice biocinemático. Curiosamente, a relação entre e_{mec} e MFEL não tem sido pouco investigada.

A relação entre MFEL e VC (ou PC):

A inconveniência em adotar MFEL como teste de avaliação do nível de treinamento aeróbio, ou para prever o desempenho em eventos com duração entre 30 a 60 minutos, está em seu extenso protocolo, além da obtenção de informações (amostras de lactato sanguíneo) por técnicas invasivas (BILLAT *et al.*, 2003). No sentido de amenizar a extensão temporal do protocolo, a relação entre MFEL e índices lactacídemicos da aptidão aeróbia por protocolos progressivos tem sido proposta nos estudos de Jones; Doust (1998), Smith; Jones (2001) e Dekerle *et al.* (2003). Outros estudos, no entanto, preocuparam-se em estimar a MFEL por modelagem matemática, a partir de testes progressivos com o objetivo de minimizar a amplitude temporal do teste, como Billat *et al.* (1994), Beneke, 2003; e Smerkal *et al.* (2002). Mas, a relação entre MFEL com protocolos de campo, sem amostragens invasivas, como VC (ou PC), a tornaria mais usual no cotidiano (avaliação, predição e prescrição) (BARON *et al.*, 2005a), além de dirimir a disputa entre estes dois índices pela indexação do limite superior do domínio severo do exercício (PRINGLE; JONES, 2002).

A comparação direta entre os parâmetros VC (ou PC) e MFEL determinados independentemente indica, pela ausência de diferenças estatísticas, que representam, provavelmente, o mesmo fenômeno fisiológico (SMITH; JONES, 2001). Para estes mesmos autores, um discreto aumento de 0,5km/h na velocidade correspondente a MFEL resulta em um contínuo acúmulo de lactato ao longo da atividade. Pringle; Jones (2002) verificaram que, quando seus sujeitos pedalarão em uma potência maior que aquela correspondente a MFEL (>P-MFEL, 241 ± 24W) e muito próxima à PC (242 ± 25W), houve um aumento significativo da concentração sanguínea de lactato, da ventilação pulmonar (VE), e do VO₂, conduzindo muitos dos sujeitos à exaustão antes dos 30 minutos.

A comparação entre os tempos de exaustão durante o exercício nestes dois índices

fisiológicos tem sido verificada como marcadamente diferentes, prevendo a exaustão em 44 ± 10 min em MFEL, podendo atingir 63 ± 12 min com o treinamento (BILLAT *et al.*, 2004). Enquanto que em VC (ou PC), o tempo de exaustão tem-se observado estar entre 30 e 40 min em diferentes modos de exercício (BRICKLEY *et al.*, 2002; DEKERLE, 2006), ou ainda menor (~22 a 33 min), segundo Housh *et al.* (1991). Outra importante diferença é observada na intensidade relativa ao VO_{2max} demandada em MFEL e em VC (ou PC): 71,3 ± 5,2% e 85,4 ± 4,8%, respectivamente (BARON *et al.*, 2005b).

Estas discrepâncias seriam suficientes para diferenciar exercícios realizados com suprimento energético predominantemente provindo dos sistemas oxidativos daqueles cuja ativação anaeróbia contribui parcialmente para o fornecimento energético total, o que classicamente tem sido identificado como limiar, ou área de transição, entre os metabolismos de ressíntese energética nos músculos em trabalho (SMERKAL *et al.*, 2002).

Mas o quanto ampla deveriam ser as diferenças entre as intensidades correspondentes a MFEL e VC (ou PC) para promover alterações do perfil fisiológico e caracterizar domínios distintos do exercício. Uma característica do domínio pesado do exercício é a ocorrência de um componente adicional do VO₂ que se sobrepõe à cinética exponencial primária, que lenta e progressivamente aumenta até atingir uma estabilidade tardia (XU; RHODES, 1999; WHIPP *et al.*, 2005) e que se constata associar com o acúmulo de lactato (XU; RHODES, 1999). A normalização da intensidade do exercício que delimita a transição para este tipo de resposta corresponde, segundo Smith; Jones (2001), à 50% da faixa entre o LL e o VO_{2max} (conceito de % delta - Δ). O componente lento na cinética do VO₂ tem sido comumente observado entre a MFEL e VC (ou PC), porém pode-se evidenciar a ocorrência da MFEL em %Δ (51 ± 14%) (SMITH; JONES, 2001) similares àqueles estimados para VC (ou PC) (41 – 55%) (PRINGLE; JONES, 2002).

Apesar de ser postulado que o exercício em PC não é sustentado sem um aumento na concentração do lactato, Jones; McConnell (1999) observaram que a comparação entre a corrida e o ciclismo realizados a 50%Δ proporcionava a ocorrência do componente lento do VO₂ entre o 3º minuto e o final de ambas as atividades, totalizando 10 ± 3% e 6 ± 1% da resposta do VO₂ na atividade, respectivamente, no ciclismo e corrida. Mas enquanto as diferenças para o componente lento do VO₂ foram consideradas significativas, a concentração de lactato ao final de cada exercício foi considerada semelhante (corrida = 5,5 ± 1,6 mM; ciclismo 5,9 ± 1,5 mM). Essas concentrações não são diferentes daquelas apresentadas por Baron *et al.* (2007) ao final de

um exercício em MFEL ($6,18 \pm 2,5$ mM), por Brickley *et al.* (2002) na exaustão ($29:34 \pm 8:32$ min) em PC ($7,3 \pm 1,6$ mM), e por Dekerle *et al.* (2005) em velocidade muito próxima à VC ($5,9 \pm 1,9$ mM). Ainda, o exercício em $50\% \Delta$ demanda uma intensidade respectiva a 86% do VO_{2max} , que corresponde melhor com VC e, a partir do qual, se verifica um aumento contínuo do VO_2 (BILLAT *et al.*, 1998), que tende a se estabilizar tardiamente (3 a 6 min.), ou progredir até exaustão voluntária, sem, contudo, conduzir ao VO_{2max} (PRINLGE; JONES, 2002). Para Carter *et al.* (2002), a indução ao VO_{2max} é uma característica observada em exercícios realizados entre 80 a $100\% \Delta$.

O componente lento do VO_2 tem sido um comportamento circunscrito ao domínio pesado do exercício (JONES; McCONNELL, 1999; WHIPP *et al.*, 2005), observado na corrida (CARTER *et al.*, 2002), ciclismo (KOPPO; BOUCKAERT, 2002), e natação (DEMARIE *et al.*, 2001), que é caracterizado por uma resposta exponencial do VO_2 sobreposta à resposta primária, com amplitude <250 e <600 $ml \times min^{-1}$, com *time delay* (TD) >100 e $<180s$ (BILLAT *et al.*, 1998; JONES; McCONNELL, 1999; SCHEUERMANN *et al.*, 2001; CARTER *et al.*, 2002; PRINGLE *et al.*, 2003), e cujos fatores de terminantes são o aumento da concentração de lactato e de catecolaminas, o trabalho dos músculos ventilatórios e cardíaco, elevação da temperatura corporal, ativação de músculos acessórios e recrutamento de fibras brancas menos eficientes (XU; RHODES, 1999; WHIPP *et al.*, 2005).

No caso específico do recrutamento das fibras brancas, têm-se hipotetizado que a ativação em velocidades sub-ótimas de contração diminui sua eficiência contrátil, demandando um aumento do ganho na relação entre fornecimento energético versus cargas ($VO_2/carga$) durante a atividade constantes, bem como aumentando a produção de lactato (CARTER *et al.*, 2002), que por si seria suficiente para aumentar o metabolismo, devido ao aumento do processo de remoção do lactato nos músculos ativos e em outros tecidos e pela maior desoxigenação do complexo HbO_2 e MbO_2 (XU; RHODES, 1999). No entanto, evidências da influência destes dois parâmetros não são conclusivas (KOPPO; BOUCKAERT, 2002; WHIPP *et al.*, 2005). Algumas especulações apontam para a redução da eficiência mecânica do músculo pela perturbação do padrão motor causada pelo acúmulo do lactato, o que demandaria uma maior produção energética (componente lento) para a manutenção da potência requerida para a atividade (DEMARIE *et al.*, 2001). Entretanto, a influência das variações na eficiência mecânica, ou no custo energético de transporte (economia de movimento), sobre o comportamento do lactato e cinética do VO_2 em

intensidades correspondentes a MFEL e VC (ou PC), não foram investigadas.

Mecânica de nado e suas implicações para a avaliação de MFEL e PC

Devido à dificuldade em modelar a relação $P-t_{Lim}$ na natação pela ausência de procedimentos de estimativa da potência mecânica externa (P_o) em uma faixa de velocidade de nado variando entre submáxima à máxima, a variável mecânica de maior significado fisiológico, na natação, para compor o modelo $P-t_{Lim}$ seria fornecida pela equação 14, em condições de nado atado (PESSÔA FILHO; DENADAI, 2008):

$$P_o = \left(\frac{Frp}{ep} \right) \times v_{Hidrof} \quad (14)$$

onde P_o é a potência gerada pelos músculos durante a braçada; ep é a eficiência propulsiva (que determina a fração de P_o útil à propulsão – P_u); e v_{Hidrof} é a velocidade do hidrofólio. Esta equação satisfaz, quantitativamente, o total de potência mecânica gerada pelos músculos ativos na natação atada, assim como esta potência seria uma aproximação daquela produzida em condições de nado desimpedido (Equação 15), à medida que Frp no nado atado atendesse a especificidade de superar uma resistência similar ao arrasto ativo em condições de nado desimpedido (PESSÔA FILHO; DENADAI, 2008).

$$Fp_{Total} = \frac{Frp(N)}{ep(decimal)} \quad (15)$$

onde Fp_{Total} é a quantidade de força produzida pelos elementos contráteis na execução da braçada; $eFrp$ é a força do hidrofólio útil à propulsão (TOUSSAINT, 1990).

A força (atada) máxima registrada em velocidade nula é reconhecida como uma medida da força propulsiva máxima que, teoricamente, corresponde à força (propelidora) necessária para sobrepor a resistência (Fr) em velocidade máxima de nado desimpedido (CLARYS, 1979). Entretanto, há uma tendência em considerar a força atada como uma versão exagerada da força propelidora que o nadador é capaz de alcançar, uma vez que a velocidade para trás do hidrofólio, em relação à água, diminui à medida que a velocidade do corpo à frente aumenta (MARTIN *et al.*, 1981), causando uma redução na força propulsiva (PESSÔA FILHO; DENADAI, 2008).

Apesar disto, algumas observações em nado completamente atado e em intensidade entre 85-100% da frequência de braçada máxima concluíram que os padrões eletromiográficos dos músculos do braço eram semelhantes aqueles induzidos no nado desimpedido (BOLLENS *et al.*,

1988). Ainda, Yeater *et al.* (1981) mostraram a existência de relações entre a força máxima em nado atado e a velocidade do crawl; e Costill *et al.* (1983) encontraram uma correlação significativa ($r = 0,84$) entre a potência de nado medida na água pelo sistema de nado atado e o desempenho de nado em 25 jardas. Por fim, Kjendlie; Thorsvald (2006) reportaram que o nado atado é um método confiável para estimar a força atada máxima de nado, uma vez que medidas de teste e re-teste produziram coeficientes de correlação elevados e baixos coeficientes de variação para desempenhos realizados em dias e períodos do dia diferentes, por nadadores de alta e média habilidade, sob condições familiarizada e não-familiarizada com a tarefa.

Assim, para considerar a especificidade da equação 14 assume-se, conforme Pessoa Filho; Denadai (2008), a partir de uma análise dedutiva do mecanismo de produção de força do hidrofólio:

a) redução da velocidade da mão relativa ao corpo do nadador; se a velocidade do hidrofólio (u) com relação à velocidade do corpo do nadador (v) é $u + v$, então sem qualquer movimento do corpo à frente u é reduzida e isto também resulta em uma menor quantidade de potência desperdiçada (P_k), porque a variação da velocidade da massa de água seria também reduzida (deGROOT; van INGEN SCHENAU, 1988);

b) uma parcela do total de potência mecânica é empregada beneficemente na superação da resistência oferecida pela carga;

c) outra parcela altera a energia cinética de uma massa de água, como resultado do movimento para trás do hidrofólio durante a braçada;

d) a intensidade da resistência externa deve induzir a uma sobrecarga de força conhecida em condições de nado desimpedido, e apenas a carga respectiva ao arrasto ativo (Fr) em uma dada velocidade de nado atenderia ao pressuposto de paralelismo da força entre as condições de nado;

O resultado principal do estudo de Pessoa Filho *et al.* (2008) foi comprovar o emprego da força de arrasto ativo máximo (Fr_{max}) como parâmetro de ordem na determinação da intensidade de carga a ser empregada no sistema atado de nado em testes de exaustão. Assim como, verificar a compatibilidade da potência crítica em *crawl-atado* ($P_{AtadoCrit}$) enquanto índice da intensidade de nado que pode ser sustentada por longa duração, a partir de suas relações com a VC. Os dados destes autores revelam que percentuais entre 75 a 100% Fr_{max} proporcionam tempos de exaustão (t_{Lim}) entre 200 a 900s, com baixa variabilidade entre os nadadores. A partir das informações sobre t_{Lim} , o modelo forneceu, por ajustes linear e hiperbólico, os parâmetros de

PC_{Atada} ($81,90 \pm 26,29W$ e $71,10 \pm 23,66W$, respectivamente), CTA ($12,90 \pm 6, kJ$ e $19,47 \pm 8,18kJ$, respectivamente) e r^2 ($0,93 \pm 0,06$ e $0,96 \pm 0,03$, respectivamente). Cabe lembrar que os valores mencionados de PC correspondem a potência propulsiva crítica atada (PuC_{Atada}), assim, precisam ser corrigidos por ep para fornecer o parâmetro formulado pela Equação 14: a potência muscular crítica atada (PoC_{Atada}). Ao corrigi-los pelo valor de 60%, que teoricamente é previsto para ep (TOUSSAINT *et al.*, 1998), estes autores obtiveram valores de $\sim 136,67W$ e $\sim 118,3W$ para PC por ajustes linear e hiperbólico, respectivamente.

A relação entre PuC_{Atada} e VC para ajuste linear (0,812) e hiperbólico de 2-parâmetros (0,767) e entre PuC_{Atada} com o desempenho de nado em 800m (-0,81 e -0,82) e 1500m (-0,83 e -0,85), evidenciam a viabilidade do modelo proposto, bem como a influência sobre o desempenho em provas com predominância do metabolismo aeróbio (PESSÔA FILHO; DENADAI, 2008). A comparação com índices lactacidêmicos de limiares metabólicos forneceria, segundo estes autores, o contexto fisiológico de PuC_{Atada} .

Dados de Pu_{Atado} em MFEL, obtidos em nosso laboratório e ainda não publicados, seguiram os procedimentos metodológicos descritos por Pessoa Filho *et al.* (2008) para a determinação do modelo $P_{Atado-t_{Lim}}$, sendo os testes de intensidade constante para a determinação de MFEL baseados em percentuais de PuC_{Atada} quantificada por ajuste hiperbólico de 2-parâmetros. Os nadadores analisados ($n = 10$) tinham $16,6 \pm 1,4$ anos; $69,8 \pm 9,5$ kg de massa corporal; $175,8 \pm 4,6$ cm de estatura; $7,0 \pm 4,0$ % de gordura corporal e; $1,29 \pm 0,11$ m/s de desempenho nos 400 metros (v_{400-m}). Na Tabela 1 são apresentados os valores de velocidade e potência em MFEL, VC e PC.

Tabela 1: Valores de velocidade e de potência na máxima fase estável de lactato (MFEL) e velocidade crítica (VC) no crawl-atado e desimpedido.

	Média	DP	CV (%)
Pu_{MFEL} (W)	89,2	15,1	16,94
PuC_{Atada} (W)	99,4*	22,9	23,12
v_{MFEL} (m/s)	1,17	0,11	9,25
VC (m/s)	1,19*	0,12	9,68

* $p \leq 0,05$ em relação à MFEL.

Foram identificadas diferenças entre as variáveis de potência e velocidade em MFEL com

seus respectivos pares de variáveis no modelo $v \cdot t_{Lim}$ (VC) e $P_{Atado} \cdot t_{Lim}$ (PuC) de ajustes lineares, quando analisadas pelo teste de Teste-T (bicaudal, para dados pareados). Assim, os achados de Smith; Jones (2001) são corroborados parcialmente pelos resultados apresentados, sugerindo que há restrições quanto ao uso indiscriminado de uma variável pela outra para demarcar o mesmo perfil fisiológico (por exemplo, limite entre os domínios pesado e severo). De fato, a quantificação de VC por ajustes lineares tende a uma pequena superestimação da intensidade correspondente à MFEL (SMITH; JONES, 2001), o que já seria suficiente para tornar as condições metabólicas dissociadas entre estas intensidades (DEKERLE *et al.*, 2003). Para Smith; Jones (2001) e Dekerle *et al.* (2003), a precisão do controle da intensidade nos testes de determinação destes parâmetros é fundamental para a descrição das diferenças fisiológicas no exercício em cada uma destas intensidades. A diferença entre as potências em MFEL e PC de ajuste linear foi de 10,2 W em média, que é menor em relação àquela (20 W) descrita por Pringle; Jones (2002) para a diferença entre a potência correspondente a MFEL e PC no ciclismo, a qual foi suficiente para estimular um aumento significativo na lactacidemia, ventilação pulmonar (VE) e VO_2 em comparação com o exercício realizado em MFEL. Se for considerado o fato de que a potência mecânica externa (P_o) na natação depende da eficiência propulsiva (ep), então a diferença entre MFEL e PC no presente estudo cresce para 33,14% ($ep \sim 0,45$), acentuando a tendência de respostas fisiológicas diferentes. Porém, nenhuma variável fisiológica foi avaliada na VC, neste estudo, para confirmar essas pressuposições.

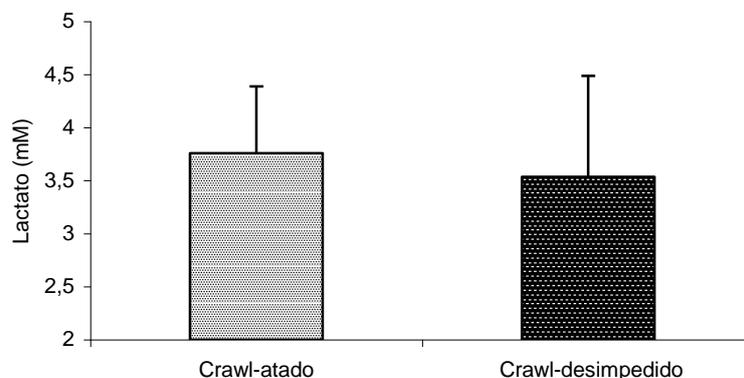


Figura 1. Comparação entre as concentrações de lactato na máxima fase estável de lactato (MFEL) no crawl-atado e desimpedido.

Tabela 2: Valores do coeficiente de Pearson (r) entre velocidade e potência em máxima fase estável de lactato (MFEL) com a velocidade crítica (VC) e potência crítica (PC) obtidas por ajuste linear.

	v_{MFEL} (m/s)	VC - (m/s)	PuC_{Atada} (W)
P_{UMFEL} (W)	0,756*	0,862***	0,763**
v_{MFEL} (m/s)	-	0,974**	0,615*
VC - (m/s)	-	-	0,724*

*Correlação significativa em $p \leq 0,05$. **Correlação significativa em $p \leq 0,01$.

A relação entre as estimativas de MFEL e destas com parâmetros VC e PuC_{Atada} pelo coeficiente de Pearson (r) estão apresentadas na Tabela 2. Existiram correlações significantes entre os parâmetros de MFEL e VC determinadas no nado atado e desimpedido. Embora possam determinar intensidades de exercício diferentes, essas correlações sugerem que as variáveis a MFEL e VC podem ser determinadas por mecanismos fisiológicos similares.

A Figura 1 mostra a comparação entre as concentrações de lactato em MFEL no crawl-atado e desimpedido. A ausência de diferenças entre as concentrações de lactato em MFEL no crawl-atado e desimpedido, quando comparadas pelo teste-T para amostras dependentes, confirmam a semelhança entre a taxa de ativação da glicólise e o balanço entre produção e remoção do lactato nos parâmetros de velocidade e potência em MFEL. Esse resultado confirma a especulação de que o nado-atado é um ergômetro apropriado para a avaliação de índices da aptidão aeróbia por modelos de desempenho, como já demonstrado por Pessoa Filho *et al.* (2008) e no presente estudo, também por índices lactacidêmicos.

A concentração de lactato em MFEL no crawl-atado correlacionou com v_{MFEL} (-0,73), v_{400-m} (-0,64) e VC (-0,69). Isso sugere que quanto menor a taxa de ativação da glicólise para uma dada potência mecânica submáxima, maior será o desempenho em índices da aptidão aeróbia. Por outro lado, a lactacidemia em v_{MFEL} não demonstrou correlações com nenhuma das variáveis em nado crawl-atado e desimpedido.

A comparação de VC (ou PC) com índices fisiológicos circunscritos ao seu redor deve ser apropriadamente analisada para se obter uma boa discriminação destes estímulos. Além disto, sem uma referência confiável sobre os mecanismos básicos do controle metabólico no nado em VC (ou PC), e ao seu redor, a compreensão do metabolismo energético muscular e das limitações à tolerância ao exercício não serão adequadamente viáveis para sustentar VC (ou PC) como uma ferramenta confiável para acessar o perfil fisiológico, para fornecer recomendações para o treinamento e para prever o desempenho. Esse estudo sugere que os parâmetros em MFEL diferem daqueles obtidos em VC (ou PC), o que restringe o uso indiscriminado de uma variável pela outra, devido à tendência em superestimar MFEL. O nado atado parece ser uma condição válida para avaliar a capacidade aeróbia de nadadores. No entanto, a análise destes índices através da cinética do VO_2 , poderia fornecer informações mais esclarecedoras.

Referências

BARON, B; DEKERLE, J; DEPRETZ, S, LEFEVRE, T; PELAYO, P. Self selected speed and maximal lactate steady state in swimming. **Journal of Sport Medicine and Physical Fitness**, v. 41, n. 1, p. 1-6, 2005a.

BARON, B; DEKERLE, J; ROBIN, S, NEVIERE, R; DUPONT, L. Physiological responses during exercise performed to exhaustion at critical power. **Journal of Human Movement Studies**, v. 49, p. 169-180, 2005b.

BARON, B; NOAKES, TD; DEKERLE, J; MOULLAN, F; ROBIN, S; MATRAN, R; PELAYO, P. Why does exercise terminate at the maximal lactate steady state intensity? **British Journal of Sports Medicine**, v. 42, n.10, p.828-833, 2008.

BARSTOW, TJ; JONES, AM; NGUYEN, PH; CASABURI, R. Influence of muscle fiber type and pedal frequency on oxygen uptake kinetics of heavy exercise. **Journal of Applied Physiology**, v. 81, p. 1642–1650, 1996.

BENEKE, R; HÜTLER, M; LEITHÄUSER, R. Maximal lactate steady-state independent of

performance. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, v. 32, p. 1135-1139, 2000.

BENEKE, R. Maximal lactate steady state concentration (MLSS): experimental and modelling approaches. **European Journal of Applied Physiology** v. 88, p. 361–369, 2003.

BENEKE, R; LEITHÄUSER, R; HÜTLER, M. Dependence of the maximal lactate steady state on the motor pattern of exercise. **British Journal of Sports Medicine**, v. 35, p. 192–196, 2001.

BILLAT, VL; DALMAY, F; ANTONINI, MT; CHASSAIN, AP. A method for determining the maximal steady state of blood lactate concentration from two levels of submaximal exercise. **European Journal of Applied Physiology**, v. 69, p. 196-202, 1994.

BILLAT, VL; KORALSZTEIN, JP. Significance of the velocity at VO_{2max} and time to exhaustion at this velocity. **Sports Medicine**, v. 22, p. 90–108, 1996.

BILLAT, VL; RICHARD, R; BINSSE, VM; KORALSZTEIN, JP; HAOUZI, P. The VO_2 slow component for severe exercise depends on type of exercise and is not correlated with time to fatigue. **Journal of Applied Physiology**, v. 85, p. 2118–2124, 1998.

BILLAT, LV; KORALSZTEIN, JP; MORTON, RH. Time in human endurance models: From empirical models to physiological models. **Sports Medicine**, v. 27, p. 359–379, 1999.

BILLAT, V.L.; MORTON, R.H.; BLONDEL, N.; BERTHOIN, S.; BOCQUET, V.; KORALSZTEIN, J.P.; BARSTOW, T.J. Oxygen kinetics and modeling of time to exhaustion whilst running at various velocities at maximal oxygen uptake. **European Journal of Applied Physiology**, v. 82, p. 178-187, 2000.

BILLAT, VL; SIRVENT, P; PY, G; KORALSZTEIN, J-P; MERCIER, J. The concept of maximal lactate steady state a bridge between biochemistry, physiology and sport science. **Sports Medicine**, v. 33, n. 6, p. 407-426, 2003.

BILLAT, V; SIRVENT, P; LEPRETRE, PM; KORALSZTEIN, JP. Training effect on performance, substrate balance and blood lactate concentration at maximal lactate steady state in master endurance runners. **Pflugers Archives**, v. 447, p. 875–883, 2004.

BOLLENS, E; ANNEMANS, L; VAES, W; CLARYS, JP. Periferical EMG comparison between fully tethered and free front crawl swimming. In: Ungerechts BE, Wilke K, Reischle K. (eds.) **Swimming Science V**, v. 18, p. 173-182, 1988.

- BRICKLEY, G; DOUST, J; WILLIAMS, CA. Physiological responses during exercise to exhaustion at critical power. **European Journal of Applied Physiology**, v. 88, p. 146-151, 2002.
- BULL, A.J.; HOUSH, T.J.; JOHNSON, G.O.; PERRY, S.R. Effect of mathematical modeling on the estimation of critical power. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, v. 32, p. 526-530, 2000.
- BULL, AJ; HOUSH, TJ; JOHNSON, GO; RANA, SR. Physiological response at five estimates of critical velocity. **European Journal of Applied Physiology**, 2007.
- BURNLEY, M; DOUST, JH; CARTER, H; JONES, AM. Effects of prior exercise and recovery duration on oxygen uptake kinetics during heavy exercise in humans. **Experimental Physiology**, v. 86, p. 417-425, 2001.
- CAPUTO, F; DENADAI, BS. The highest intensity and the shortest duration permitting attainment of maximal oxygen uptake during cycling: effects of different methods and aerobic fitness level. **European Journal of Applied Physiology**, v. 103, p. 47-57, 2008.
- CARTER, H; PRINGLE, JS; JONES, AM; DOUST, JH. Oxygen uptake kinetics during treadmill running across exercise intensity domains. **European Journal of Applied Physiology**, v. 86, p. 347-354, 2002.
- CLARYS, JP. Human morphology and hydrodynamics. In: Terauds J., Bedingfield EW. (eds) **Swimming III**, v. 8, p. 3-41, 1979.
- COSTILL, DL; KING, DS; HOLDREN, A. HARGREAVES, M. Sprint speed vs. swimming power. **Swimming Technique**, v. 20, p. 20-22, 1983.
- DEKERLE J. The use of critical velocity in swimming: a place for critical stroke rate? In: VILAS-BOAS JP, ALVES F, MARQUES A. (eds.) Biomechanics and Medicine in Swimming X. **Revista Portuguesa de Ciências do Desporto**, v. 6, n. 2, p. 201-205, 2006.
- DEKERLE, J; SIDNEY, M; HESPEL, JM; PELAYO, P. Validity and reliability of critical speed, critical stroke rate, and anaerobic capacity in relation to front crawl swimming performances. **International Journal of Sport Medicine**, v. 23, p. 93-98, 2002.
- DEKERLE, J; BARON, B; DUPONT, L; VANVELCENAHHER, J; PELAYO, P. Maximal lactate steady state, respiratory compensation threshold and critical power. **European Journal of Applied Physiology**, v. 89, p. 281-288, 2003.
- DEKERLE, J; PELAYO, P; CLIPET, B; DEPRETZ, G; LEFEVRE, T; SIDNEY, M. Critical SwimmingSpeed Does not Represent the Speed at Maximal Lactate Steady State. **International Journal of Sport Medicine**, v. 26, p. 524-530, 2005.
- DEMARIE, S; SARDELLA, F; BILLAT, V; MAGINI, W; FAINA, M. The VO₂ slow component in swimming. **European Journal of Applied Physiology**, v. 84, p. 95-99, 2001.
- DiPRAMPERO, PE; DEKERLE, J; CAPELLI, C; ZAMPARO, P. The critical velocity in swimming. **European Journal of Applied Physiology**, v.102, n. 2, p. 165-172, 2008.
- DOPSAJ, M; MATKOVIC, I; ZDRAVKOVIC, I. The relationship between 50m – freestyle results and characteristics of tethered forces in male sprint swimmers: a new approach to tethered swimming test. **Physical Education and Sports**, v. 1, n. 7, p. 15-22, 2000.
- FAINA, M; BILLAT, V; SQUADRONE, R; de ANGELIS, M; KORALSZTEIN, JP; DAL MONTE, A. Anaerobic contribution to the time to exhaustion at the minimal intensity at which maximal oxygen uptake occurs in elite cyclists, kayakists and swimmers. **European Journal of Applied Physiology**, v. 76, p. 13-20, 1997.
- GAESSER, GA; POOLE, DC. The slow component of oxygen uptake kinetics in humans. **Medicine and Science in Sport and Exercise**, v. 24, p. 35-71, 1996.
- GAESSER, GA; CARNEVALE, TJ; GARFINKEL, A; WALTER, DO; WOMACK, CJ. Estimation of critical power with nonlinear and linear models. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, v. 27, p. 1430-1438, 1995.
- deGROOT, G; INGEN SCHENAU, GV. Fundamentals mechanics applied to swimming: technique and propelling efficiency. In: Ungerechts BE, Wilke K, Reischle K. (eds.) **Swimming Science V**, v. 18, p. 17-30, 1988.
- HILL, DW; FERGUSON, CS. A physiological description of critical velocity. **European Journal of Applied Physiology**, v. 79, p. 290-293, 1999.
- HILL, DW; POOLE, DC; SMITH, JC. The relationship between power and the time to achieve VO_{2max}. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, v. 34, p. 709-714, 2002.
- HOUSH, DJ; JOHNSON, GO; MCDOWELL, SL; HOUSH, TJ; PEPPER, M. Physiological responses at the fatigue threshold. **International Journal of Sport Medicine**, v. 12, p. 305-308, 1991.
- JONES, AM; DOUST, JH. The validity of the lactate minimum test for determination of the maximal lactate steady state. **Medicine and**

Science in Sports and Exercise, v. 30, p. 1304–1313, 1998.

JONES, AM; MCCONNELL, AM. Effect of exercise modality on oxygen uptake kinetics during heavy exercise. **European Journal of Applied Physiology**, v. 80, p. 213–219, 1999.

JONES, AM; CARTER, H. The effect of endurance training on parameters of aerobic fitness. **Sports Medicine**, v. 29, p. 373–386, 2000.

KANEKO, M. Mechanics and energetics in running with special reference to efficiency. **Journal of Biomechanics**, v. 23, n. 1, p. 57-63, 1990.

KJENDLIE, P-L; THORSVALD, K. A tethered swimming power test is high reliable. In: VILAS-BOAS, JP; ALVES, F; MARQUES, A. (eds.) Biomechanics and Medicine in Swimming X. **Revista Portuguesa de Ciências do Desporto**, v. 6, n. 2, p. 231-235, 2006.

KOPPO, K; BOUCKAERT, J. The Decrease in the VO_2 slow component induced by prior exercise does not affect the time to exhaustion. **International Journal of Sport Medicine**, v. 23, p. 262–267, 2002.

MARTIN, RB; YEATER, RA; WHITE, MK. A simple analytical model for the crawl stroke. **Journal of Biomechanics**, v. 14, n. 8, p. 539-48, 1981.

MORITANI, T; NAGATA, A; DE VRIES, HA; MURO, M. Critical power as a measure of critical work capacity and anaerobic threshold. **Ergonomics**, v. 24, p. 339–350, 1981.

MORTON, R.H. The critical power and related whole-body bioenergetic models. **European Journal of Applied Physiology**, v. 96, p. 339-354, 2006.

MORTON, R.H. A 3-parameter critical power model. **Ergonomics**, v. 39, p. 661-619, 1996.

MORTON, H; BILLAT, V. Maximal endurance time at VO_{2max} . **Medicine and Science in Sports and Exercise**, v. 32, p. 1496-504, 2000.

MONOD, H; SCHERRER; J. The work capacity of synergy muscular group. **Ergonomics**, v. 8, p. 339-50, 1965.

PENDERGAST, DR; CAPELLI, C; CRAIG, Jr, AB; DiPRAMPERO, PE; MINETTI, AE; MOLLENDORF, J; TERMIN, A; ZAMPARO, P. Biophysics in swimming. In: VILAS-BOAS, JP; ALVES, F; MARQUES, A. (eds.) Biomechanics and Medicine in Swimming X. **Revista Portuguesa de Ciências do Desporto**, v. 6, p. 185-189, 2006.

PESSÔA FILHO, DM; NASCIMENTO, EP; DENADAI, BS. Validação do modelo potência-tempo limite no crawl-atado pelas relações com os modelos distância/tempo limite e velocidade/tempo limite. **Revista Brasileira de Ciências do Esporte**, v. 29, n. 2, p. 95-114, 2008.

PESSÔA FILHO, DM; DENADAI, BS. Mathematical basis for modeling swimmer power output in the front crawl tethered swimming: an application to aerobic evaluation. **The Open Sports Science Journal**, v. 7, p. 31-37, 2008.

POOLE, DC; WARD, SA; GARDNER, G; WHIPP, BJ. Metabolic and respiratory profile of the upper limit for prolonged exercise in man. **Ergonomics**, v. 31, p. 1265–1279, 1988.

PRINGLE, JS; JONES, AM. Maximal lactate steady state, critical power and EMG during cycling. **European Journal of Applied Physiology**, v. 88, p. 214–226, 2002.

PRINGLE, JS; DOUST, JH; CARTER, H; TOLFREY, K; CAMPBELL, IT; SAKKAS, GK; JONES, AM. Oxygen uptake kinetics during moderate, heavy and severe intensity “submaximal” exercise in humans: the influence of muscle fibre type and capillarisation. **European Journal of Applied Physiology**, v. 89, p. 289–300, 2003.

ROUARD, AH; AUJOUANNET, YA; HINTZ, F; BONIFAZI, M. Isometric force, tethered force and power ratios as tools for the evaluation of technical ability in freestyle swimming. In: VILAS-BOAS, JP; ALVES, F; MARQUES, A. (eds.) Biomechanics and Medicine in Swimming X. **Revista Portuguesa de Ciências do Desporto**, v. 6, n. 2, p. 249-250, 2006.

SAHLIN, K; SORENSEN, JB; GLADDEN, LB; ROSSITER, HB; PEDERSEN, PK. Prior heavy exercise eliminates VO_2 slow component and reduces efficiency during submaximal exercise in humans. **Journal of Physiology**, v. 564, p. 765–773, 2005.

SCHEUERMANN, BW; HOELTING, BD; NOBLE, ML; BARSTOW, TJ. The slow component of O_2 uptake is not accompanied by changes in muscle EMG during repeated bouts of heavy exercise in humans. **Journal of Physiology**, v. 531, p. 245–256, 2001.

SMERKAL, G; SCHARL, A; VON DUVILLARD, SP; POKAN, R; BACA, A; BARON, R; TSCHAN, H; HOFMANN, P; BACHL, N. Accuracy of neuro-fuzzy logic and regression calculations in determining maximal lactate steady-state power output from incremental tests in humans. **European Journal of Applied Physiology**, v. 88, p. 264–274, 2002.

SMITH, CGM; JONES, AJ. The relationship between critical velocity, maximal lactate steady-state velocity and lactate turnpoint velocity in runners. **European Journal of Applied Physiology**, v. 85, p. 19-26, 2001.
<http://dx.doi.org/10.1007/s004210100384>.

TOUSSAINT, HM. Differences in propelling efficiency between competitive and triathlon swimmers. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, v. 22, n. 03, p.: 409-415, 1990.

TOUSSAINT, H.M.; WAKAYOSHI, K.; HOLLANDER, A.P.; OGITA, F. Simulated front crawl swimming performance related to critical speed and critical power. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, v. 30, n. 1, p. 144-151, 1998.

VORONTSOV, A; POPOV, O; BINEVSKY, D. Dyrko, V. The assessment of specific strength in well-trained male athletes during tethered swimming in the swimming flume. In: Vilas-Boas, JP; Alves, F; Marques, A. (eds.) Biomechanics and Medicine in Swimming X. **Revista Portuguesa de Ciências do Desporto**, v. 6, n. 2, p. 275-277, 2006.

WAKAYOSHI, K; YOSHIDA, T; UDO, M; HARADA, T; MORITANI, T; MUTOH, Y; MIYASHITA, M. Does critical swimming velocity represent exercise intensity at maximal lactate steady state? **European Journal of Applied Physiology**, v. 66, p. 90–95, 1993.

WARD-SMITH, AJ. The bioenergetics of optimal performances in middle-distance and long-distance track running. **Journal of Biomechanics**, v. 32, p. 461–465, 1999.

WHIPP, BJ; WARD, SA; ROSSITER, HB. Pulmonary O₂ uptake during exercise: conflating muscular and cardiovascular responses. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, v. 37, p. 1574–1585, 2005.

XU, F; RHODES, EC. Oxygen uptake kinetics during exercise. **Sports Medicine**, v. 27, p. 313-27, 1999.

YEATER, RA; MARTIN, RB; WHITE, MK; GILSON, KH. Tethered swimming forces in the crawl, breast and back strokes and their relationship to competitive performance. **Journal of Biomechanics**, v. 14, n. 8, p. 527–37, 1981.

Esse artigo foi apresentado em Sessão Temática no VI Congresso Internacional de Educação Física e Motricidade Humana e XII Simpósio Paulista de Educação Física, realizado pelo Departamento de Educação Física do IB/UNESP Rio Claro, SP de 30/4 a 03/5 de 2009.

Endereço:

Benedito Sérgio Denadai
Laboratório de Avaliação da Performance Humana, IB/UNESP
Av. 24 A, 1515 Bela Vista
Rio Claro SP Brasil
13506-900.
e-mail: bdenadai@rc.unesp.br

Recebido em: 10 de fevereiro de 2009.

Aceito em: 03 de abril de 2009.



Motriz. Revista de Educação Física. UNESP, Rio Claro, SP, Brasil - eISSN: 1980-6574 - está licenciada sob [Licença Creative Commons](#)