

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

INSTITUTO DE BIOCENCIAS - CAMPUS DE RIO CLARO

**ANÁLISE DA CINÉTICA DO VO₂ NO DOMÍNIO SEVERO DO CRAWL EM
CONDIÇÃO ATADA DE NADO**

*VO₂ kinetics analysis during swimming at severe domain in tethered-crawl
condition*

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO HUMANO E
TECNOLOGIAS

NIVEL:
MESTRADO

CANDIDATO:
LEANDRO OLIVEIRA DA CRUZ SIQUEIRA

ORIENTADOR:
PROF. DR. DALTON MÜLLER PESSÔA FILHO

INICIO DO CURSO:
MARÇO DE 2013

RIO CLARO
Estado de São Paulo-Brasil
Abril de 2015

LEANDRO OLIVEIRA DA CRUZ SIQUEIRA

**ANÁLISE DA CINÉTICA DO VO₂ NO DOMÍNIO SEVERO DO CRAWL EM
CONDIÇÃO ATADA DE NADO**

Dissertação apresentada ao Instituto de
Biotecnologia da Universidade Estadual
Paulista Júlio de Mesquita Filho, como
parte dos requisitos para a obtenção do
título de Mestre em Desenvolvimento
Humano e Tecnologias

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Dalton Müller Pessôa Filho

Prof. Dr. Camila Coelho Greco

Prof. Dr. Luiz Guilherme Antonacci Guglielmo

Rio Claro, abril de 2015

Siqueira, Leandro Oliveira da Cruz Siqueira.
Análise da cinética do vo2 no domínio severo do
crawl em condição atada de nado / Leandro Oliveira da
Cruz Siqueira, 2015
134 f.

Orientador: Dalton Müller Pessoa Filho

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual
Paulista. Instituto de Biociências, Rio Claro, 2014

1. Cinética do VO2. 2. Teste incremental. 3. Nado atado. I. Universidade Estadual Paulista. Instituto de Biociências. II. Análise da cinética do vo2 no domínio severo do crawl em condição atada de nado.

Dedicatória

*Aos meus pais;
Ao meu irmão;
Ao meu amor;
À minha família;
Aos meus amigos;
Aos meus companheiros;
Sem vocês, nada disso seria possível.*

Agradecimentos

Aos meus pais (**Elaine e Zoel**), responsáveis pela minha vida, e por me possibilitar, através de muitos sacrifícios, as condições mais que necessárias para ter as melhores oportunidades. Vocês são meus exemplos e modelos de “ser Humano”, de pais e companheiros. Nem todos os agradecimentos do mundo serão suficientes. Amo vocês.

Ao meu Irmão (**Lucas**), obrigado por todas as milhares de vezes que te pedi para entregar meus documentos, e ser o meu melhor e maior amigo, te amo.

Ao meu Orientador (**Prof. Dr. Dalton Müller Pessoa Filho**). Neste caminho acadêmico é necessário um condutor, e, se eu consigo chegar a algum lugar, devo isso a você. Todos os seus ensinamentos, orientações e construções de conhecimento são ensinamentos que sempre levarei comigo. Muito obrigado!

A minha grande família (avôs e avós, tios, tias, primos e primas) levo dentro de mim, um pouco de cada um de vocês. Obrigado!

Aos amigos **Astor, Mário** (Institute Polytechnical Septúbal, Portugal), e todos os amigos do LABOREH por toda ajuda, companheirismo e auxílio, existe muito de vocês neste trabalho. Muito obrigado!

Aos nadadores da Associação Bauruense de Desportos Aquáticos **(ABDA)** e ao técnico **Daniel** por possibilitar que essa pesquisa pudesse ser colocada em prática e por ter sempre paciência com as infindáveis e exaustivas coletas. Muito Obrigado!

Aos amigos **Fernando e Gabriel** por me aturarem nos dias mais estressantes, principalmente quando perdia a paciência com a louça, vocês não me deixaram perder a linha. Muito obrigado!

A minha noiva **(Naiara)** por me encorajar, incentivar e me dar forças, até nas horas mais difíceis, a permanecer na luta em busca desse sonho, à você eu só tenho a dizer que tudo isso é por você, é por nós, e sem você, não teria sentido. Eu te amo!

A todos os amigos e amigas que me ajudaram a tornar tudo isso possível, um forte abraço a cada um de vocês.

Lista de Figuras

- Figura 1 : Ajuste da cinética do VO₂ nas transições ao redor do ponto de compensação respiratória (PCR) **27**
- Figura 2 : Ilustração no teste de força atada com a célula de carga (A), utilização do novo Aquatrainer (B), aplicação do sistema de roldana com carga no sistema de nado atado (C), visão geral do protocolo incremental (D), e análise da cinética do VO₂ em um protocolo de teste constante no nado atado (E) **41**
- Figura 3 Perfil da resposta do VO₂ e Frequência de Braçada (FB) durante o teste incremental de nado atado Individual (A e B) e média do grupo (C e D). As linhas de tendência foram melhor ajustadas para (A) $VO_2 = -0.7857x^2 + 196.89x - 8076.9$; (B) $FB = -0.00003x^2 + 0.0113x + 0.2147$; (C) $VO_2 = -1.5017x^2 + 158.18x - 1135.5$; e (D) $FB = 0.0001x^2 + 0.004x + 0.8607$ **48**
- Figura 4 Resposta da permute gasosa durante um teste incremental de nado atado e determinação dos limiares para um nadador masculino **49**
- Figura 5 Três padrões de respostas observados no VO₂ durante o nado atado em teste na iVO₂max entre os nadadores. Painel A (primeira resposta rápida com componente lento e contínua até VO₂max), B (resposta inicial rápido fixada no VO₂max), e C (resposta inicial rápida atingindo um platô , com o segundo aumento provocando VO₂max próximo do limite de tolerância) **52**

Lista de Quadros e tabelas

Quadro 1 Descrição dos limites, tolerância e mecanismos de exaustão nos diferentes domínios de intensidade **28**

Tabela 1 Média dos valores aeróbios máximos e submáximos avaliados no teste incremental de nado atado. **47**

Tabela 2 Parâmetros da cinética do VO₂ durante um teste de nado atado na iVO₂max. **51**

Lista de Abreviaturas

Lista de abreviaturas empregadas no texto, descritas em ordem alfabética.

Sigla	Descrição	Sigla	Descrição
A	constante de proporcionalidade na equação do arrasto	iVO_{2max}	carga referente ao VO_{2max}
A_0	amplitude da assíntota da fase cardiodinâmica	[Lac ⁻]	concentração de lactato sanguíneo
A_0'	valor da amplitude do VO_2 na fase cardiodinâmica	Lb	comprimento de braçada
A_1	amplitude da assíntota da segunda exponencial da resposta do VO_2	LL	limiar de lactato
A_1'	valor da amplitude de vo_2 na segunda exponencial da resposta	LPG	limiar de permuta gasosa
A_2	amplitude da assíntota da terceira exponencial de resposta do VO_2	MFEL	máxima fase estável de lactato
A_2'	valor da amplitude de vo_2 na terceira exponencial da resposta	MG	massa gorda
Ad	quantidade de trabalho por unidade de distância percorrida	MIG	massa isenta de gordura (massa magra e conteúdo mineral ósseo)
As	quantidade de trabalho por braçada	MT	massa total
CargaCrítica _{Atada}	carga crítica no teste de nado atado	PC	peso corporal
Carga- t_{Lim}	modelo carga-tempo limite	P_{Crit}	potência crítica
CL	componente lento	PCR	ponto de compensação respiratória
DAN	distância anaeróbia de nado	P_{ET/CO_2}	pressão expiratória final de CO_2
% Δ (delta)	diferença % entre o VO_2 no II e o VO_{2max}	P_{ET/O_2}	pressão expiratória final de O_2
d_B	distância percorrida por braçada	P_o	potência mecânica muscular total
$d_{Lim}-t_{Lim}$	modelo distância-tempo limite	P_u	potência mecânica externa útil à propulsão
DXA	raio-x de dupla absorção	QR	coeficiente respiratório
ED	duração do exercício	r^2	índice de significância
Fb	frequência de braçada	τ (tau)	constante de tempo da resposta do vo_2
FC	frequência cardíaca	τ_0	constante de tempo da resposta cardiodinâmica
FC_{max}	frequência cardíaca máxima	τ_1	constante de tempo da segunda exponencial
$F_{medAtada}$	média dos picos de força nos 30 segundos de teste	τ_2	constante de tempo da terceira exponencial
$F_{maxAtada}$	média dos picos de força nos 5 segundos iniciais de teste	t	tempo

Fr	Força de arrasto	t_{Lim}	tempo limite do exercício até a exaustão
iLPG	carga referente ao LPG	TD	Tempo de retardo na resposta (Time delay)
iPCR	carga referente ao PCR		
TD ₁	início da segunda exponencial (fase primária) da cinética do VO_{22}	VE/VCO_2	equivalente respiratório para o VCO_2
TD ₂	início da terceira exponencial (fase do componente lento) da cinética do VO_{22}	VE/VO_2	equivalente respiratório para o VO_2
V_{200}	velocidade respectiva ao desempenho máximo em 200 m de crawl desimpedido	V_{MFEL}	velocidade relativa a máxima fase estável de lactato
V_{400}	velocidade respectiva ao desempenho máximo em 400 m de crawl desimpedido	VO_2	consumo pulmonar de oxigênio
V_{800}	velocidade respectiva ao desempenho máximo em 800 m de crawl desimpedido	VO_{2EE}	consumo pulmonar de oxigênio ao final do exercício
V_{1500}	velocidade respectiva ao desempenho máximo em 1500 m de crawl desimpedido	VO_{2max}	potência aeróbia máxima
V	velocidade de desempenho	$v-t_{Lim}$	modelo velocidade-tempo limite
VC	velocidade crítica	vVO_{2max}	velocidade a 100% do VO_{2max}
VE	ventilação pulmonar por minuto		

RESUMO

Análise da cinética do VO_2 no domínio severo do crawl na condição atada de nado

Principais interesses sobre os dados disponíveis sobre a capacidade aeróbia de nadadores avaliados durante o nado atado são (1) conceber tecnologia para analisar o consumo de oxigênio (VO_2), (2) dissociação temporal da resposta da permuta gasosa para o processo fisiológico subjacente, e (3) marcadores indiscerníveis para discriminação dos limiares dos parâmetros ventilatórios. Portanto, o objetivo foi projetar um teste incremental atado (ITT), com carga de trabalho progressiva (WL) com base nas taxas individuais de força máxima atada (F_{max}), em estilo crawl e, portanto, identificar o limiar de lactato (LT), Limiar de Permuta Gasosa (GET) e Ponto de Compensação Respiratória (PCR). Onze homens ($18,0 \pm 4,0$ anos, $180,2 \pm 6,8$ cm e $71,8 \pm 9,5$ kg), nadadores realizaram um teste incremental atado máximo (ITT) até a exaustão voluntária para avaliar o VO_{2max} . Nadadores realizaram o ITT, atados a uma polia de carga pelo tronco, até a exaustão voluntária para encontrar o limiar de permuta gasosa (LPG), o ponto de compensação respiratória (PCR) e a potência aeróbia máxima (VO_{2max}). Houve o aumento da carga de trabalho incremental, de 30 a 70 % da F_{max} com incremento de 5% por minuto. O valor de F_{max} foi obtido por célula de carga de 500kgf em um teste máximo com duração de 30 s. A permuta gasosa foi coletada, respiração a respiração por um analisador de gases portátil (COSMED K4b2) conectado ao nadador por um snorkel específico (new-AquaTrainer) LPG e PCR foram examinados visualmente, usando as respostas dos parâmetros V_E/V_{CO_2} , V_E/VO_2 , $P_{ET}CO_2$ e $P_{ET}O_2$. Os critérios para determinar o LPG foram: aumento na curva da relação

V_E/VO_2 e na $P_{ET}O_2$, sem alteração da relação V_E/VCO_2 e na $P_{ET}CO_2$. Para PCR: aumento concomitante e sustentado dos parâmetros V_E/VO_2 e V_E/VCO_2 , concomitante à diminuição da $P_{ET}CO_2$. A média de VO_{2max} aproximadamente foi $52,4 \pm 4,9 \text{ mlO}_2 \times \text{kg}^{-1} \times \text{min}^{-1}$ e $45,4 \pm 6,0 \text{ mlO}_2 \times \text{kg}^{-1} \times \text{min}^{-1}$ para o sexo masculino e feminino, respectivamente. O WL no VO_{2max} foram $93,9 \pm 14,1N$ e $74,4 \pm 8,0N$ para homens e mulheres respectivamente. GET aproximadamente foi $65,6 \pm 8,7\%$ e $64,2 \pm VO_{2max} 7,3\%$ WL VO_{2max} para o sexo masculino, e $63,1 \pm 6,0\%$ e $56,2 \pm VO_{2max} 6,1\%$ WL VO_{2max} para o sexo feminino. PCR atingiu $89,6 \pm 4,5\%$ e $87,5 \pm VO_{2max} 5,9$ WL VO_{2max} para o sexo masculino e $87,2 \pm 2,8\%$ e $85,0 \pm VO_{2max} 5,8$ WL VO_{2max} para o sexo feminino. Durante o nado livre a variação média do VO_{2max} é de $45 -70 \text{ mlO}_2 \times \text{kg}^{-1} \times \text{min}^{-1}$, de acordo com as diferenças de sexo, nível de habilidade, especificidade do treinamento, e método de amostragem e tratamento VO_2 . A partir de estudos que aplicam o nado atado, o VO_{2max} variou de 46-67 $\text{mlO}_2 \times \text{kg}^{-1} \times \text{min}^{-1}$. A avaliação de limiares no nado livre, baseada em critérios ventilatórios ou critérios de lactato sanguíneo mostraram uma ampla gama (65 a 80%) em relação à velocidade aeróbia máxima (VAM) para LPG ou LL. Para PCR ou limiar anaeróbio (LAn) foram relatados uma relação de 70 a 90% do MAS. Assim, os marcadores de VO_{2max} e limiares no nado atado foram localizados na faixa semelhante dos que estão no nado livre, garantindo a confiabilidade do teste incremental atado real para avaliar a capacidade e potência aeróbia do nadador. A descrição matemática da cinética do VO_2 foi baseada na primeira função mono-exponencial com atraso de tempo (TD) A análise residual foi aplicada a discriminar o componente primário do VO_2 e o componente lento (CL), sua ocorrência pode ser perceptível a partir de uma

mono-exponencial sem TD. O tempo de tolerância médio de WLO_2max foi 330.4 ± 61.1 -s atingindo $100,4 \pm 5,0\%$ VO_2max . Todos os nadadores atingiram VO_2max tendo como resposta primária de VO_2 ($92,9 \pm 7,9\%$ VO_2max) associado ao CL ($12,3 \pm 5,6\%$ de VO_2 no final do exercício, $EEVO_2$), com constante de tempo de $22,9 \pm 9,5$ s para a resposta primária e $136,9 \pm 30.1$ -s para a ocorrência do CL. De acordo com os resultados da literatura, o tempo limite no $WLVO_2max$ observado no presente trabalho é mais alinhada com os valores reportados para nadadores não-elite (300 ± 50 s) em nado livre. Embora, na análise da amplitude e tempo de resposta na transição do VO_2 para o componente primário ($\sim 95\%$ e ~ 15 VO_2max^{-s}), e CL ($\sim 15\%$ de $EEVO_2$ e 90 a 180 s) relataram que as respostas do nado livre estão alinhados próximos as respostas durante a transição repouso para o trabalho em $WLVO_2max$. Assim, o perfil oxidativo durante o nado atado no VO_2max não difere do que é apresentado durante o nado livre no mesmo domínio fisiológico.

Palavras-chave: Cinética do VO_2 ; teste incremental; potência aeróbia; nado atado.

ABSTRACT***VO₂ kinetics analysis during swimming at severe domain in tethered-crawl condition***

Major concerns about the available data on swimmer's aerobic capacity assessed during tethered-swimming are (1) devise technology to sample oxygen uptake (VO_2), (2) temporal mismatching of gas exchange response to underlying physiological process, and (3) indiscernible markers for threshold discrimination from ventilatory parameters. Therefore, the aimed was designs an incremental tether-test (ITT) with step workload (WL) based on individual rates of maximal tether-force (F_{max}) in crawl stroke, and thus identifies the lactate threshold (LT), by means of gas exchange response (GET), and respiratory compensation point (RCP). Eleven males (18.0 ± 4.0 years old, 180.2 ± 6.8 cm height, and 71.8 ± 9.5 kg body weight) and five females (16.8 ± 3.6 years old, 166.2 ± 5.5 cm height, and 61.1 ± 9.8 kg body weight) swimmers performed an ITT until volitional exhaustion attached to a weight-baring pulley-rope system to the assessment of GET, RCP and maximal aerobic power (VO_{2max}). WL was incremented from 30 to 70% of F_{max} , with step rate of 5% every minute. F_{max} was measured with a 500kgf load cell attached to the swimmers by an inelastic rope, during full-crawl all-out bout lasting 30-s. Pulmonary gas exchange was sampled breath-by-breath (CPET K4b2) connected to a specific snorkel (new AquaTrainer). GET criteria were: rising in V_E/VO_2 with no concomitantly changes on V_E/VCO_2 ; and PCR criteria were: sustained increasing in both V_E/VO_2 and V_E/VCO_2 . Mean VO_{2max} approached 52.4 ± 4.9 $mlO_2 \times kg^{-1} \times min^{-1}$ and 45.4 ± 6.0 $mlO_2 \times kg^{-1} \times min^{-1}$ for

males and female swimmers, respectively. The WL at VO_2 max were 93.9 ± 14.1 N and 74.4 ± 8.0 N for males and females, respectively. GET approached $65.6 \pm 8.7\%$ VO_2 max and $64.2 \pm 7.3\%$ WL VO_2 max for males, and $63.1 \pm 6.0\%$ VO_2 max and $56.2 \pm 6.1\%$ WL VO_2 max for females. RCP attained $89.6 \pm 4.5\%$ VO_2 max and 87.5 ± 5.9 WL VO_2 max for males, and $87.2 \pm 2.8\%$ VO_2 max and 85.0 ± 5.8 WL VO_2 max for females. During free-swimming the range of mean VO_2 max measured is $45 - 70$ ml $O_2 \times kg^{-1} \times min^{-1}$, according to the differences in sex, skill level, training specificity, and method of VO_2 sample and treatment. From studies applying tethered swimming, VO_2 max ranged from 46 to 67 ml $O_2 \times kg^{-1} \times min^{-1}$. The thresholds assessment in free-swimming, based on either ventilatory or blood lactate criteria showed a wide range (65 to 80%) relative to maximal aerobic speed (MAS) for GET or LT. For RCP or anaerobic threshold (AnT) have been reported a range from 70 to 90% of MAS. Thus, the VO_2 max and thresholds markers in tethered-swimming were located in the similar range of those in free-swimming, ensuring the reliability of the actual incremental tether-test to assess swimmer's aerobic capacity and power. Mathematical description of VO_2 on-kinetics was based on first order exponential function with time delay (TD). The residual analysis was applied to discriminate primary VO_2 component from the slow component (SC), if its occurrence could be discernible from a mono-exponential without TD. Mean tolerable time at WL O_2 max was 330.4 ± 61.1 -s, reaching $100.4 \pm 5.0\%$ VO_2 max. All swimmers attained VO_2 max from primary response of VO_2 ($92.9 \pm 7.9\%$ VO_2 max) associated to SC ($12.3 \pm 5.6\%$ of VO_2 at the end of exercise, EE VO_2), with time constant of 22.9 ± 9.5 -s for primary response and 136.9 ± 30.1 -s for SC occurrence. According to results from literature, the time limited at WL VO_2 max

observed in the present work is best aligned to the values reported to non-elite swimmers (300 ± 50 -s) in free-swimming. Although, on-transition analysis of VO_2 amplitude and time response for primary component ($\sim 95\%$ $\text{VO}_{2\text{max}}$ and ~ 15 -s), and SC ($\sim 15\%$ of EEVO_2 and 90 to 180-s) reported to free-swimming are closed aligned to the responses during rest-to-work transition at $\text{WLVO}_{2\text{max}}$. Thus, oxidative profile during tethered-swimming at $\text{VO}_{2\text{max}}$ does not differ from that exhibit during free-swimming at the same physiological domain.

Key-words: VO_2 on-kinetics; incremental test; aerobic capacity, tethered-swimming.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:	20
2.1. Domínios do Exercício e Cinética do VO_2 :.....	20
2.2 Teoria do Nado atado e suas relações com o Nado livre (desimpedido): 27	
3. OBJETIVO	33
3.1. Hipóteses.....	33
4. MÉTODOS.....	34
4.1. Sujeitos	34
4.2. Delineamento experimental.....	35
4.3. Composição corporal total e regional	36
4.4. Protocolo de força máxima no nado atado	36
4.5. Protocolo do teste incremental	37
4.6. Protocolo de teste constante.....	41
4.7. Análises estatísticas	43
5. RESULTADOS	44
5.1. Teste progressivo atado (ITT).....	44
5.2. Análise da cinética do VO_2	48
6. DISCUSSÃO.....	51
6.1. Potência aeróbia máxima	51
6.2. Marcadores submáximos de capacidade aeróbia	52
6.3. Tolerância de nado e cinética do VO_2 na iVO_2max	56
7. CONCLUSÃO	64

1. INTRODUÇÃO

O nado atado (estacionado ou com deslocamento) tem sido reportado como a condição de nado mais amplamente usado para mensurar a força da braçada realizada durante o nado (YATER et al., 1981; DOPSAJ et al., 2000), uma vez que esta condição é considerada esporte-específica para simular as características da natação, com respeito ao ambiente (HUIJING et al., 1983), mecânica da braçada e de nado, pois não influencia nem restringe os movimentos dos braços (braçadas) e das pernas (pernadas), respeitando a especificidade mecânica e ambiental (CABRI et al., 1988; ROURAD et al., 2006; MOROUÇO et al., 2011; AMARO et al., 2014), aspectos fisiológicos (HOLMÉR, 1983) e a influência dos parâmetros antropométricos e morfológicos do corpo (tamanho, formato, estatura e peso corporal) sobre a formação de forças de propulsão e de arrasto (CLARYS, 1979). Entretanto valores de força de braçada registrados no nado atado não estão alinhados com valores obtidos sobre a força de propulsão no nado-livre (condição não-atada) (CRAIG; BOOMES, 1980; YEATER et al., 1981; DOPSAJ et al., 2000; PESSOA FILHO; DENADAI, 2008; DOMINGUEZ-CASTELLS; ARELLANO, 2012).

Portanto a F_{atada} não deve ser utilizada como parâmetro de avaliação da capacidade propulsiva do nadador, pois a eficiência propulsiva (ou seja, o quanto da força de braçada se torna disponível para gerar propulsão e é transferida ao meio aquático) é praticamente nula no nado-atado (TOUSSAINT et al., 2006). A F_{atada} parece ser melhor aproveitada como uma forma de análise específica para a força de braçada no nado livre, cuja extensão é um fator importante para a propulsão de acordo com o nível técnico, idade e sexo do nadador (MAGEL, 1970; MAGLISCHO et al., 1984; TOUSSAINT, 1990;

JHONSON et al., 1993; WRIST et al., 1999; ROURARD et al., 2006; MOROUÇO et al., 2011; AMARO et al., 2014).

Além disto, alguns resultados mostram que o nado atado pode ser uma boa ferramenta na avaliação da aptidão aeróbia e da capacidade de nado (aptidão muscular para fornecimento da demanda metabólica e de produção de força de nadadores), proporcionando confiabilidade e validade para a avaliação da capacidade aeróbia e anaeróbia, e Uma vez que a força crítica em nado atado (F_{crit}) apresenta significativas correlações com outros parâmetros da avaliação aeróbia de nadadores, como o limiar de lactato (LL) ($\pm 1,96$ dp) e a velocidade de nado nos 400 metros (v_{400m}) e com a velocidade média no teste de 30 minutos (T30) ($R^2 = 0,94 \pm 0,06$) (PAPOTI et al., 2010). Através do nado atado pode-se obter medidas que possibilitem analisar o desempenho e as capacidades físicas do nadador, e apresentar valores para o controle adequado da carga de trabalho e estímulo para o treinamento, pois, a partir das respostas fisiológicas do sistema cardio-circulatório (HOLMER, 1982) e respiratório (BONEN et al., 1980; RINEHARD et al., 1991; PAPOTI et al., 2013; PINNA et al., 2013), o perfil de lactato sanguíneo (PAPOTI et al., 2010; PESSOA FILHO et al., 2014) é possível delimitar cargas e parâmetros de intensidade para melhor estímulo ao nadador.

A utilização da carga obtida através do nado atado como parâmetro de intensidade possui um melhor controle de resposta que a velocidade obtida em testes com o nado livre, devido ao fato de ser mais controlável pois é mais fácil o controle de intensidade quando a mesma é controlada de forma externa (carga), mas a questão da validade e da confiabilidade das avaliações fisiológicas no nado atado ainda necessitam ser mais aprofundadas. Pinna et

al, (2013) avaliaram parâmetros máximos e submáximos da aptidão aeróbia (limiar anaeróbio e VO_2max) em um teste incremental com o nado atado, através dos valores obtidos, semelhantes aos valores apresentados na literatura, pode-se validar o nado atado com relação ao contexto ambiental. Embora alguns autores, como Pinna et al., (2013) e Papoti et. al., (2013), não terem realizado a análise da permuta gasosa a partir de um dispositivo que obtivesse respostas respiração-a-respiração, aplicou a mesma carga de trabalho relativa aos nadadores, e analisou o consumo de oxigênio ao final do teste incremental.

Principais considerações sobre tais procedimentos são (1) discrepância temporal frente aos processos fisiológicos (devido ao rápido aumento da carga de trabalho) evidenciado a partir do perfil da permuta gasosa (SCHEUERMANN; KOWALCHUK, 1998); e (2) diferenças fisiológicas dos sujeitos, em resposta à mesma carga de trabalho externo ou velocidade-rítimo (TOKMAKIDIS et al., 1998; LÚCIA et al., 2002; JACOBS et al., 2011), o que seria mais evidente na natação, considerando a especificidade do treinamento e a influência técnica na proficiência de braçada (TOUSSAINT, 1990; WAKAYOSHI et al., 1995). É sugerido que o nadador menos eficiente atinja o VO_2max em etapas anteriores do protocolo devido ao aumento da carga de trabalho, tornando ainda mais difícil a análise em limiares submáximos, pois é necessário uma maior sensibilidade e capacidade de discernimento do protocolo de análise da resposta da permuta gasosa (RINEHARDT et al., 1991; AMANN et al., 2004; WHIPP et al., 2007).

Por isso é justificada a necessidade de maior exploração da avaliação da capacidade aeróbia do nadador e a utilização de mecanismos tecnológicos

que realizem a análise respiração-a-respiração como forma de sustentar a confiabilidade do nado atado para obtenção de informação do perfil metabólico e oxidativo do nadador, e conseqüentemente, sua tolerância ao exercício.

Ainda, valores de VO_2max obtidos em nado atado (46,5 – 66,7 $\text{ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$), não diferem de valores reportados em canal de nado (swimming flume), tampouco de valores reportados em nado livre, porém são maiores que valores reportado em testes inespecíficos, como em ergômetros de braço ou perna e em esteira (PINNA et al. 2013).

A resposta do consumo de oxigênio pulmonar (VO_2) e o estado da relação ácido-base no sangue durante exercícios com intensidade constante têm sido utilizados para definir os domínios de intensidade do exercício pela cinética do VO_2 (BURNLEY; JONES, 2007). Três domínios são comumente descritos. O exercício moderado, que engloba intensidades do exercício abaixo do limiar de lactato (LL), no qual a concentração de lactato ($[\text{lact}]$) no sangue não é elevada e o VO_2 projeta-se mono-exponencialmente a uma fase estável (JONES; POOLE, 2005). O domínio pesado do exercício situa-se entre o LL e a potência crítica (maior intensidade de trabalho aeróbio sustentado sem que haja alteração contínua na homeostase) (P_{crit}), resultando em uma elevada, mas estável da $[\text{lact}]$ ao longo do tempo e o VO_2 atinge um estado estável tardio, após a presença de um aumento adicional do VO_2 (componente lento, $\text{VO}_{2\text{CL}}$). No domínio severo (entre P_{crit} e $\text{VO}_{2\text{max}}$), o $\text{VO}_{2\text{CL}}$ falha em estabilizar e, caso o exercício seja sustentado, pode atingir o valor máximo do VO_2 , enquanto a $[\text{lact}]$ aumenta continuamente até ao final do exercício (BURNLEY; JONES, 2007).

Por isso, enfatiza-se que a análise da cinética do VO_2 , em testes de intensidade constante, poderia fornecer respostas definitivas sobre a condição fisiológica demandada em nado atado e, assim, poder compará-lo ao nado desimpedido, em intensidades pré-definidas e equivalentes, antes de refutar definitivamente o uso indiscriminado de uma condição de nado pela outra.

Então, se o perfil metabólico em nado desimpedido pode ser caracterizado pela cinética do VO_2 , sua aplicação ao nado atado poderia auxiliar na contextualização de evidências de natureza fisiológica, que refutariam ou não, a existência de especificidade entre as condições de nado em situações padronizadas de intensidade (exemplo: na carga ou velocidade correspondente ao Ponto de Compensação Respiratório - PCR). Assim, a temática principal do presente estudo foi analisar a cinética do VO_2 durante exercícios de intensidade constante na condição de nado-atado. A hipótese é que há paridade das respostas fisiológicas aeróbias obtidas em teste progressivo, bem como da cinética do VO_2 (parâmetros temporais e amplitudes) no domínio severo em condição de nado-atado com essas mesmas análises realizadas em nado desimpedido que se encontram disponíveis na literatura.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:

O texto elaborado a seguir visa apresentar o estado atual do conhecimento sobre os dois principais temas abordados no presente projeto: cinética do VO_2 , domínios do exercício e nado atado:

2.1. Domínios do Exercício e Cinética do VO_2 :

A importância do limite entre os domínios pesado e severo é delimitar uma mudança considerável na tolerância ao exercício, sendo menor quanto mais rápido o CL projeta-se ao VO_{2max} . Isto é, atingir antecipadamente o VO_{2max} torna a exaustão eminente, uma vez que o CL pode estar associado à taxa de utilização anaeróbia e à acumulação de metabólitos (BURNLEY; JONES, 2007). De acordo com Jones e Poole (2005), o limite superior do domínio pesado é definido como a maior intensidade de exercício no qual VO_2 e a concentração de lactato no sangue [lact] podem ser mantidos em um nível elevado, mas estável. Pelas definições, tanto PC (a inclinação da relação entre a potência (P) e o tempo (t), que é o parâmetro limítrofe para o fornecimento aeróbico e compreende a noção de que, se $P \leq PC$, o fornecimento anaeróbio não é necessário e o tempo em exercício é infinitamente longo (MORTON, 2006), como a máxima fase estável de lactato (MFEL: maior carga ou velocidade constante que pode ser mantida ao longo do tempo sem o contínuo acúmulo de lactato no sangue – BENEKE et al., 2001) atendem as expectativas de respostas fisiológicas pressupostas no limite superior do domínio pesado. No entanto, comparações entre a PC e a potência em MLSS sugerem que PC

e MLSS são diferentes e não devem ser usadas em reciprocidade (PRINGLE; JONES, 2002).

A caracterização da cinética do VO_2 no domínio pesado do exercício sugere a presença de até três fases exponenciais da resposta do VO_2 . A primeira fase, denominada fase I, ou componente cardiodinâmico, sendo marcada por um rápido aumento no VO_2 , representando os primeiros 15-25 segundos de exercício, e representa o aumento da extração de O_2 alveolar pelo maior fluxo sanguíneo pulmonar, causado pelo aumento do débito cardíaco. Esta fase também ocorre nos demais domínios de intensidade do exercício. A fase II, ou componente primário, reflete as mudanças no metabolismo oxidativo muscular, podendo ou não envolver uma resposta estável do VO_2 e resulta do aumento da extração de O_2 na mistura venosa. Para Whipp et al. (2005), esta fase representa o consumo de O_2 pelos músculos ativos e mantém equivalência com a permuta de O_2 no leito capilar pulmonar. Este é o principal componente a ser analisado nos diferentes domínios do exercício. A terceira e última fase, denominada de fase III, ocorre com a estabilidade no débito cardíaco e na extração de O_2 pelos músculos.

Esse modelo matemático trifásico que caracterizando a resposta do VO_2 ao exercício constante em intensidade pesada pode ser descrita como:

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

onde “ $VO_2(t)$ ” representa a variável em um dado tempo (t); “ VO_{2b} ” é a linha de base de VO_2 ; “A” é a amplitude da curvatura exponencial; “t” é a constante de tempo (ou, o tempo necessário para atingir 63% da assíntota de resposta do

VO₂ para uma intensidade do exercício); “TD” é o tempo de resposta; e “e” e a base dos logaritmos naturais.

A equação 1 descreve as fases da resposta do VO₂: a primeira exponencial, ou componente cardiodinâmico, que começa no início do exercício e termina quando a segunda fase tem origem (TD1), sendo o valor para o tempo (t0) fornecido por $A0' = A0(1-e^{-(TD1/t0)})$; durante a segunda fase, denominada componente primário, a amplitude relevante (A1') é definida como o aumento no VO₂ desde a linha de base até o valor da amplitude da assíntota da segunda exponencial (A1), caso o CL não for considerado no modelo; a terceira exponencial, ou componente lento, tem a amplitude determinada pelo VO₂, desde o TD2 até o final do exercício (A2'), ao invés do VO₂ fornecido pelo valor da assíntota desta exponencial (A2).

No entanto, quando o componente cardiodinâmico inicial é ignorado, eliminando-se os 20s iniciais da resposta ao exercício (OZYENER et al., 2001), a resposta no domínio pesado também pode ser analisada por uma equação bi-exponencial:

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

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

$$A_1' = A_1 \left(1 - e^{-\left(\frac{TD_2 - TD_1}{\tau_1}\right)} \right) \quad (3)$$

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

$$A_2' = A_2 \left(1 - e^{-\left(\frac{ED - TD_2}{\tau^2} \right)} \right) \quad (4)$$

onde “ED” é a duração total do exercício.

O modelo mono-exponencial (exemplo: desconsiderando o componente cardiodinâmico e o componente lento na Eq. 2) é razoável para a interpretação da cinética do VO_2 após o início do exercício de intensidade moderada (abaixo do limiar de lactato, LL), na qual a fase-estável do VO_2 é atingida em 2-3 minutos, ou severo, em que a resposta do VO_2 é limitada por se atingir o VO_{2max} em diferentes tempos de respostas (τ) durante o exercício (BURNLEY et al., 2001; BURNLEY; JONES, 2007). No domínio severo (cujo limite inferior é a MLSS ou CP), não há estabilização do VO_2 sendo este conduzido ao seu patamar máximo, caso a duração seja suficiente e, a [La] aumenta continuamente até ao final do exercício (XU; RHODES, 1999). Burnley; Jones (2007) sugeriram que o limite superior do domínio severo de exercício é a intensidade de exercício acima da qual a duração do esforço é tão curta, que o VO_{2max} não é atingido, mas como o VO_{2max} pode ser atingido dentro de uma zona de intensidade entre 92% a 135% VO_{2max} (BILLAT; KORALSZTEIN, 1996; CAPUTO; DENADAI, 2008) é possível a ocorrência do CL, quando a transição é realizada na intensidade mínima do exercício capaz de elicitar o VO_{2max} (DEMARIE et al., 2001; BURNLEY; JONES, 2007).

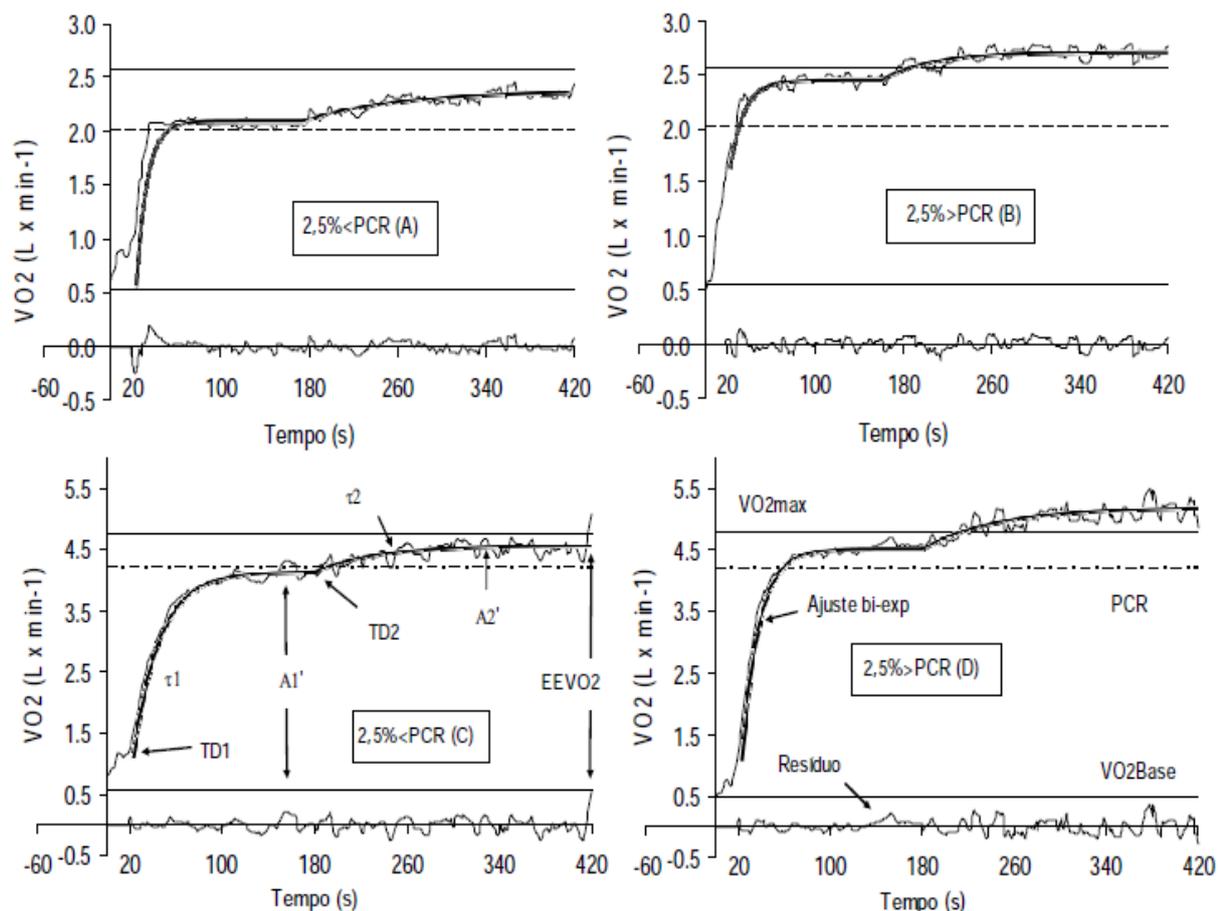
Na natação, os parâmetros de amplitude da cinética do VO_2 obtidos por Querido et al. (2006) equivaleram a 3001,9 $mLO_2 \cdot min^{-1}$ e 560,5 $mLO_2 \cdot min^{-1}$ para a resposta exponencial primária e componente lento, respectivamente, em intensidade correspondente ao VO_{2max} . Para Reis et al. (2011) a resposta primária do VO_2 acima do primeiro limiar ventilatório correspondeu à 2670 $mLO_2 \cdot min^{-1}$, enquanto o componente lento apresentou valores de em torno de

365 mlO₂.min⁻¹, que demandaram juntos uma amplitude total situada em 83%VO₂pico. Já para Pessoa Filho et al. (2012), a tendência da cinética do VO₂ na transição abaixo (~2.7%) de PCR correspondeu à intensidade de v36,8 (±8,5) %Δ (cerca de 91,4 ± 2,2%vVO₂max) e demandou uma elevação submáxima e estável do VO₂ (91,5 ± 5.7%VO₂max), após a ocorrência do componente lento com início em ~154s e amplitude média de 391,0 mlO₂.min⁻¹. Na a transição realizada acima (2%) de PCR, em intensidade de v71,1 (±17,1) %Δ (aproximadamente 96,1 ± 2,4%vVO₂max), esses autores puderam constatar que a fase estável da cinética do VO₂ mostrou-se limitada ao seu valor máximo (104,5 ± 9,4%VO₂max), após a ocorrência do componente lento com início em ~188s e amplitude de 399,0 mlO₂.min⁻¹. Desta forma, essas duas respostas caracterizaram, respectivamente, o domínio pesado e severo do exercício.

Souza et al. (2013) analisou a cinética do VO₂ em intensidade correspondente a velocidade nos 200 metros nado livre (v_{200m}) e ao limiar anaeróbio (Lan, pelo método do ponto de inflexão da curva lactacidêmica). A amplitude da resposta primária (A₁) foi de 26,32 ± 9,73 ml × kg⁻¹ × min⁻¹ e 38,43 ± 5,30 ml × kg⁻¹ × min⁻¹ para v_{Lan} e v_{200m}, correspondentemente. Enquanto que a constante de tempo da resposta primária (τ₁) foi de 18,89 ± 6,53s e 13,21 ± 5,86s e o tempo de retardo inicial da resposta (TD₁) foi de 12,36 ± 6,62s e 9,47 ± 6,42 s, ambos correspondentes a v_{Lan} e v_{200m}. Para os autores, essas respostas caracterizaram, respectivamente para v_{Lan} e v_{200m} um comportamento característico dos domínios moderado e extremo.

O comportamento da cinética do VO₂ ao redor de PCR pode ser sistematizado para a natação na Figura 1, sugerindo, assim, que ao aplicar

PCR como o limite entre os domínios pesado e severo possibilita diminuir a quantidade de testes para determinar os parâmetros dos diferentes domínios do exercício, além da variabilidade associada à determinação da potência crítica para delimitar o limite superior do exercício pesado (PESSÔA FILHO,



2010).

Figura 1: Ajuste da cinética do VO_2 nas transições ao redor do ponto de compensação respiratória (PCR) para o sujeito 01 (A e B) e 06 (C e D). Em "C" são apresentados os elementos do ajuste bi-exponencial da cinética do VO_2 , e em "D" estão identificadas as linhas utilizadas nos gráficos. Retirada de Pessoa Filho (2010), com permissão.

Um sumário dos parâmetros limítrofes dos domínios de intensidade e propostas de análise por ajustes exponenciais pode ser observado no Quadro 1, abaixo:

Quadro 1: Descrição dos limites, tolerância e mecanismos de exaustão nos diferentes domínios de intensidade*.

Domínio	Limites	Resposta da cinética do VO_2	Tolerância	Prováveis Mecanismos de Fadiga
Moderado	superior: LL	Dois componentes; estado estável alcançado dentro de 3 minutos em indivíduos saudáveis	>4h	Hipertermia (no calor), redução da ativação central/motivação (fadiga central), dano muscular (corrida)
Pesado	inferior: LL; superior: PC	Três componentes; componente lento encontrado após a fase primária; estado estável estacionário entre 10-20 minutos; elevação do VO_2	Até 3-4 horas	Depleção de glicogênio; hipertermia
Severo	inferior: PC; superior: maior intensidade que permite atingir ao VO_{2max} antes da exaustão	Dois/três componentes; desenvolvimento contínuo do componente lento se a intensidade for referente ao $VO_{2máx}$; se sustentado a intensidade, é atingido o VO_{2max}	Até 30-45 minutos	Depleção da reserva de energia representada pelo déficit de oxigênio e/ou o acúmulo de metabólitos causadores de fadiga (H^+ , $H_2PO_4^-$)
Extremo	inferior: maior intensidade que permite atingir ao VO_{2max}	Dois componentes; componente lento não evidenciado; VO_{2max} não sustentado	<120s	Falha no mecanismo de excitatório de acoplamento

*Informações extraídas de Burnley; Jones (2007).

2.2 Teoria do Nado atado e suas relações com o Nado livre (desimpedido):

Sobre a teoria do nado atado, tem sido proposto que a força (atada) máxima, registrada em velocidade nula, é reconhecida como uma medida da força de propulsão máxima que, teoricamente, corresponde à força necessária para sobrepor a resistência (F_r) em velocidade máxima de nado desimpedido (CLARYS, 1979). Outras observações, em nado atado estacionado em intensidade entre 85-100% da frequência de braçada máxima, concluíram que os padrões eletromiográficos dos músculos do braço eram semelhantes àqueles induzidos no nado desimpedido (BOLLENS et al., 1988). Ainda, Yater et al. (1981) evidenciaram relações entre a força máxima em nado atado (estacionado) 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 (com deslocamento) e o desempenho de nado em 25 jardas. De forma coletiva, os estudos vêm apresentando a potência mecânica obtida em nado atado (com deslocamento) como um parâmetro relacionado ao desempenho de velocidade máxima do crawl em nadadores jovens (RIA et al., 1990; KLENTROU; MONTPETIT, 1991) e adultos (JOHNSON et al., 1993; MOROUÇO et al., 2011).

Porém, ao comparar ambos os contextos de nado (atado vs. desimpedido) sugere-se haver diferenças no padrão técnico da braçada e em índices fisiológicos. Algumas particularidades desta diferença são:

- (a) *Quanto ao ciclo gestual de nado (comprimento da braçada (L_b) e frequência de braçada (F_b)): sugere-se que o trabalho por braçada*

($A_s = P_o/F_b$) diminui no nado atado pela redução de P_o (potência muscular). Por outro lado, o trabalho por comprimento de braçada ($A_d = A_s/L_b$) aumenta, devido à redução de L_b , ao considerar a mecânica gestual da braçada no nado atado (PESSÔA FILHO; DENADAI, 2008). Essa redução em L_b , caso fosse acompanhada de um ligeiro aumento em F_b , não forneceria vantagem fisiológica ao nado atado, por sua diferença na mecânica de braçada (redução de D_b , distância de braçada) em comparação com o nado desimpedido, uma vez que a economia de nado estaria reduzida por ser o custo gestual maior (ZAMPARO et al., 2005). No entanto, ao contrário da forma como o controle da braçada é feito no nado desimpedido com a progressão da velocidade, no nado atado não são observadas alterações da F_b com o aumento progressivo da carga, sendo a superposição das fases propulsivas o modo de coordenação da braçada no nado atado, mesmo em intensidades baixas de sobrecarga (DOMINGUEZ-CASTELLS; ARELLANO, 2012). Por isso, esses autores recomendam o nado atado como forma de treinamento para melhorar a coordenação da braçada, uma vez que o modo de sobreposição é a forma de coordenação empregada por nadadores de elite para competir em provas de velocidade.

- (b) *Quanto aos índices fisiológicos:* tem-se postulado que a concentração de lactato em 3 mmol.L^{-1} seria um valor adequado para a MFEL na natação (TAKAHASHI et al., 2009). A observação direta da concentração correspondente à MFEL na natação,

conforme protocolo padronizado em diferentes esportes por Beneke (2003), apresenta valores médios de $2,8 \pm 1,2 \text{ mmol.L}^{-1}$ a $1,24 \pm 0,11 \text{ m.s}^{-1}$, correspondente a $88,4 \pm 2,9\%$ da velocidade aeróbia máxima de nadadores homens entre $20,4 \pm 1,9$ anos (DEKERLE et al., 2005). Também estão reportados na literatura os valores de referência para a velocidade em MFEL ($1,17 \pm 0,11 \text{ m.s}^{-1}$) e sua localização em relação à velocidade limite em 400 metros ($90,75 \pm 2,19\%$), que representaria a velocidade de nado na potência aeróbia máxima (MVA) (OGITA et al., 2003). Muitos autores têm empregado o percentual em torno de MVA (%MVA) para localizar também as diferenças entre MFEL e VC. Dekerle et al. (2005) reportaram: $v_{MFEL} = 88,4\%MAS$ e $VC = 92,7\%MAS$; enquanto Espada e Alves (2010): $v_{MFEL} = 87,9\%MAS$ e $VC = 94,0\%MAS$; e Pelarigo et al. (2010) observaram $v_{MFEL} = 88,6\%MAS$ e $VC = 93,7\%MAS$. Em relação à referência de VO_2max para o nado atado e desimpedido, tem-se observado semelhança entre os valores. Em estudo recente, Pinna et al. (2013) apresentaram valores médios de VO_2max ($54,6 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$) para o nado atado que não se mostraram diferentes das médias de VO_2max ($55, 6$ e $53,4 \text{ ml.kg}^{-1}.\text{min}^{-1}$) reportadas, respectivamente, por REIS et al. (2012) e por Fernandes; Vilas-Boas (2012) para o nado desimpedido. Contudo, até o presente momento, não há estudos que estabeleceram comparações entre o nado atado e desimpedido pelo perfil do VO_2 em intensidades de nado constantes e pareadas, em termos metabólicos.

(c) *Quanto à referência de força e potência:* no nado livre, a estimativa de F_r tem apresentado valores $F_r = 26v^2$ obtidos com o uso do Mad-system, e valores de $F_r = 16v^2$ obtidos com o método de Perturbação da Velocidade (TOUSSAINT et al., 2004). Dados teóricos sugerem para o desempenho do crawl em velocidade máxima, valores para homens ($F_r = 30v^2$) e mulheres ($F_r = 24v^2$) correspondentes às velocidades de $1,86 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $1,63 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, respectivamente (TOUSSAINT et al., 2004). Para uma velocidade média de $1,63 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, a força de arrasto (F_r) seria equivalente a $66,9\text{N}$ e a potência mecânica associada à esta velocidade seria de $109,1\text{W}$. Valores de potência para a velocidade de $1,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ são de $78,9\text{W}$ (potência propulsiva, P_u) e $154,9\text{W}$ (potência externa, P_o), considerando a eficiência propulsiva equivalente a 51% no nado completo e desimpedido (ZAMPARO et al., 2005). A potência média de $115,4\text{W}$ foi reportada por Swaine (1994) como respectiva ao limiar ventilatório (LV) e correspondente a 84,3% do $\text{VO}_{2\text{pico}}$ obtido em um teste progressivo em banco de nado isocinético. Este valor é muito semelhante aos valores de $114,4\text{W}$ e de $114,5\text{W}$ reportados por Toussaint et al. (1998) para a referência de P_{Crit} estimada por ajuste linear e não-linear, respectivamente. Em relação ao nado atado, Ikuta et al. (1996) determinaram a força crítica no nado completamente atado, que apresentou valores de $6,868 \pm 1,019 \text{ kg}$ e demonstrou que a relação entre impulso ($i = \text{kg}\cdot\text{s}$) e tempo de exaustão no nado crawl atado permite um ajuste linear ($i = a + b \times t$) extremamente satisfatório ($r = 0,996$). Estes autores evidenciaram

que o parâmetro de carga crítica apresenta correlações com v_{400} ($r = 0,703$, $\rho < 0,01$), VC ($r = 0,691$, $\rho < 0,01$) e com v_{OBLA} ($r = 0,682$, $\rho < 0,05$ - velocidade correspondente a concentração de lactato fixa em 4mmol/L), constituindo-se, por isso, em um índice que pode ser adotado para acessar a capacidade aeróbia de nadadores e que sua correspondência com MFEL não pode ser descartada. Pessoa Filho et al. (2008), obtiveram valores de $91,5\text{W}$ para nadadores masculinos correspondente a VC , que fornecem uma referência de carga de $5,63\text{ kg}$. Para Papoti et al. (2010), a F_{crit} se situou em $51,9\text{N}$, não apresentou diferenças em relação à carga no Limiar de Lactato ($45,89\text{N}$) e mostrou-se correlacionada às velocidades nos 400m ($0,85$) e no teste de 30 minutos ($0,86$), sendo por isso, índice adequado para a determinação da capacidade aeróbia, prescrição do treinamento em nado atado e predição do desempenho no nado desimpedido. Já Santiago (2009) observou que F_{crit} ($75,07\text{N}$) mostrou ser maior que a intensidade em MFEL ($70,83\text{N}$), além de VC não apresentar correlação com F_{crit} .

Esses pressupostos, associados ao fato que a exposição aguda ao nado atado não prejudica a mecânica da propulsão em nado desimpedido (GOURGOULIS et al., 2013), têm sustentado as tentativas de validação do nado atado como ferramenta válida para avaliar e treinar nadadores. A aplicação de modelos mecânicos e fisiológicos de avaliação fisiológica do nadador, comumente utilizados em nado desimpedido, tem obtido sucesso no nado atado (IKUTA et al., 1996, PAPOTI et al., 2003; ALMEIDA et al. 2004, PESSOA FILHO et al., 2008; SANTHIAGO, 2009). Modelos de treinamento

empregando o nado atado (cargas resistidas ou assistidas) vêm apresentando bons resultados para a melhora do desempenho em provas de curta duração (50 e 100 metros) (ASPENES; KARLSEN, 2012), além do aprimoramento na técnica de braçada e aumento da força muscular (GIROLD et al., 2006). Sobretudo, a avaliação da força atada máxima tem revelado sua importância em provas de curta duração nas quatro técnicas de nado (MOROUÇO et al., 2011) e os programas de treinamentos em nado atado vêm apresentando eficiência igual ou superior aos programas específicos para o nado desimpedido na melhora do desempenho (GIROLD, et al. 2007).

3. OBJETIVO

O presente estudo teve como objetivo avaliar a aptidão aeróbia em um grupo de nadadores treinados, avaliando a potência aeróbia máxima ($VO_2\text{max}$) e os limiares respiratórios (ou seja, o limiar de permuta gasosa, LPG, e o ponto de compensação respiratória, PCR) em um protocolo de teste máximo incremental projetado para o nado atado. Além disso, o estudo procurou analisar a resposta do VO_2 em teste de tolerância na carga referente ao $Vo_2\text{max}$ (iVO_2).

3.1. Hipóteses

As hipóteses são foram: (1, H_0) a análise da taxa máxima de consumo de oxigênio ($VO_2\text{max}$) durante um teste incremental de intensidade no nado-atado é válido, quando comparado aos valores reportados para o nado-livre; e (2, H_1): as respostas do consumo de oxigênio (VO_2) durante as transições a $100\%VO_2\text{max}$ exibem perfil temporal e de amplitude, que caracterizam o domínio severo do exercício.

4. MÉTODOS

4.1. *Sujeitos*

Foram analisados 16 (dezesesseis) nadadores ($17,6 \pm 3,8$ anos, $175,7 \pm 9,2$ cm, $68,4 \pm 10,6$ kg, com índice na prova de 200m livre referente a 75% do recorde mundial), sendo 11 (onze) homens ($18,0 \pm 4,0$ anos, $180,2 \pm 6,8$ cm, $71,8 \pm 9,5$ kg) e 5 (cinco) mulheres ($16,8 \pm 3,6$ anos, $166,2 \pm 5,5$ cm, $61,1 \pm 9,8$ kg), que foram submetidos aos protocolos (1) progressivo (obtenção dos índices fisiológicos aeróbios) e (2) constantes (transição repouso-exercício no domínio pesado do exercício para análise da cinética do VO_2). Os nadadores apresentavam experiência de, ao menos, dois anos de participação em competições, e mais de três anos de treinamento regular e sistematizado, com volume semanal de nado de 25km, comprovados pela frequência em eventos organizados por órgãos oficiais. O resultado mais expressivo da equipe foi o terceiro lugar nos jogos abertos de São Paulo. Todos os nadadores foram avaliados também quanto à (3) composição corporal total e regional e (4) à carga crítica. Os nadadores receberam informações sobre os protocolos, preencheram e assinaram um termo de consentimento livre e esclarecido. Esta pesquisa foi protocolada na Plataforma Brasil (CAEE: 02402512.7.0000.5398) e aprovada pelo Comitê de Ética da Universidade Estadual paulista (UNESP), sob número do parecer: 237.706.

4.2. Delineamento experimental

Os sujeitos realizaram seis visitas ao laboratório, efetuando as seguintes etapas experimentais. A primeira etapa envolveu a avaliação da composição corporal total e regional. A segunda, no mesmo dia, consistiu na determinação da força máxima pico e média em nado-atado, seguido por um teste incremental, após o intervalo de 1 hora. Na terceira e quarta visitas (com intervalo de 24 horas cada), os nadadores realizaram dois testes de carga constante (referentes à menor intensidade que elicitou o $VO_2\text{max}$, $iVO_2\text{max}$), até a exaustão voluntária para a confirmação do valor do $VO_2\text{max}$ e também para a análise da resposta do VO_2 no domínio severo de nado-atado. Todos os testes foram realizados em piscina coberta de 25m, com temperatura de 28°C. Todas as avaliações foram realizadas durante o período preparatório básico da fase de periodização dos atletas, respeitando-se duas semanas de readaptação ao treinamento. Um período de familiarização ao nado-atado foi realizado por uma semana, com esforços contínuos em diferentes intensidades (moderada a pesada, graduada pela escala de Borg para percepção subjetiva ao esforço), por até 10 minutos, durante a rotina de treinamento semanal. Nos testes, os indivíduos também foram instruídos a não treinar exaustivamente no dia anterior ao da avaliação, não ingerir bebidas contendo cafeína e álcool nas 24 horas que antecederam os testes e a comparecer alimentados e hidratados no dia do teste.

4.3. Composição corporal total e regional

O método de duplo feixe de raio-X (DXA, dual-energy x-ray absorptiometry, Hologic[®], QDR Discovery Wi[®]) foi utilizado para obter a composição corporal total e regional. O software de composição corporal (Hologic APEX[®]) forneceu os valores de massa gorda (MG), massa total (MT) e massa isenta de gordura (massa magra e conteúdo mineral ósseo) (MIG), em gramas, para os segmentos corporais (pernas e braços do lado direito e esquerdo do corpo, tronco e cabeça) e para o corpo. As composições dos membros inferiores e superiores foram obtidas pela soma de MG, MT e MIG de ambos os lados do corpo. O peso corporal (PC) total foi considerado o resultado da soma das massas regionais.

O equipamento foi calibrado seguindo as recomendações de Nana et al.(2012) e todo procedimento foi operado por um técnico experiente. Os participantes apresentaram-se com roupas leves, sem sapatos e sem portar qualquer objeto metálico, ou acessórios junto ao corpo. Os sujeitos permaneceram deitados em decúbito dorsal, com 15 centímetros de distância entre os pés, mão em posição de semipronação e a 3 cm do tronco ao longo da lateral do tronco, e os sujeitos realizavam as análises trajando roupas leves e sem adereços metálicos. As linhas foram ajustadas pelo mesmo operador, obedecendo aos pontos anatômicos específicos determinados pelo fabricante.

4.4. Protocolo de força máxima no nado atado

A força-atada máxima pico e média ($F_{\text{máxAtada}}$ e $F_{\text{médAtada}}$) foram determinadas com dois esforços máximos de 30 segundos cada um, intervalados por 10 minutos de pausa, no sistema de nado-atado e executando

o nado crawl completo. A força foi obtida por um sistema de medida através de uma célula de carga de 500 kgf, previamente calibrada para a aquisição de sinal em 100 Hz, sendo formato ASCII convertido ao formato vetorial uniaxial, após suavização por filtro de 5Hz através de software próprio do fabricante (N2000PRO, Cefise[®]). A $F_{\text{máxAtada}}$ representa a média dos picos de força nos 5 segundos iniciais e a $F_{\text{médAtada}}$ a média dos picos de todo o intervalo de coleta (MOROUÇO et al., 2011). Foram utilizadas frações da $F_{\text{médAtada}}$ para estabelecer a carga em cada etapa do teste incremental. Ao final do segundo teste foi realizada a coleta de sangue (25 μ l) do lóbulo da orelha para dosagem da [La] (YSL, 2300 STAT, Yellow Springs, Ohio, EUA), nos instantes 3, 5 e 7 minutos.

4.5. Protocolo do teste incremental

Os sujeitos desempenharam um teste progressivo contínuo (ITT), com intensidade da carga variando em 5%, na faixa entre 30-100% da $F_{\text{médAtada}}$, a cada minuto. Durante os testes, a permuta gasosa pulmonar foi amostrada respiração-a-respiração, empregando um sistema automatizado portátil (K4b², Cosmed, Roma, Itália), que foi calibrado antes de cada teste e conectado ao nadador por um tubo (*snorkel*) respiratório especial (100 cm de comprimento e 38 mm de espessura) e sistema de válvula bi-direcional (35 mm Hans-Rudolf) (new AquaTrainer[®]), validado por Baldari et al. (2013).

Antes de cada teste era realizado a calibração do sistema de análise das concentrações de O₂ e CO₂, eram realizados os quatro procedimentos recomendados pelo fabricante sendo eles: (1) o ar ambiente; (2) mistura de gás de referência, com 16,0% de O₂ e 5,0% de CO₂; (3) a turbina de fluxo foi

calibrada utilizando uma seringa padrão de 3L; e (4) o delay da máscara (COSMED Ltd., 2011; Gayda et al., 2010; Baldari et al., 2013).

Subsequentemente, o novo sistema Aquatrainer[®] foi instalado nos nadadores (figura 1B), e a permuta gasosa pulmonar foi monitorada respiração a respiração em tempo real a partir do sinal transmitido por telemetria através do software K4b2 instalado num computador pessoal. Mesmo antes de cada teste atado, os nadadores repousavam por 10 minutos na borda da piscina para a mensuração da linha de base do VO_2 . Uma visão geral do teste-atado foi mostrado na Figura 2D.

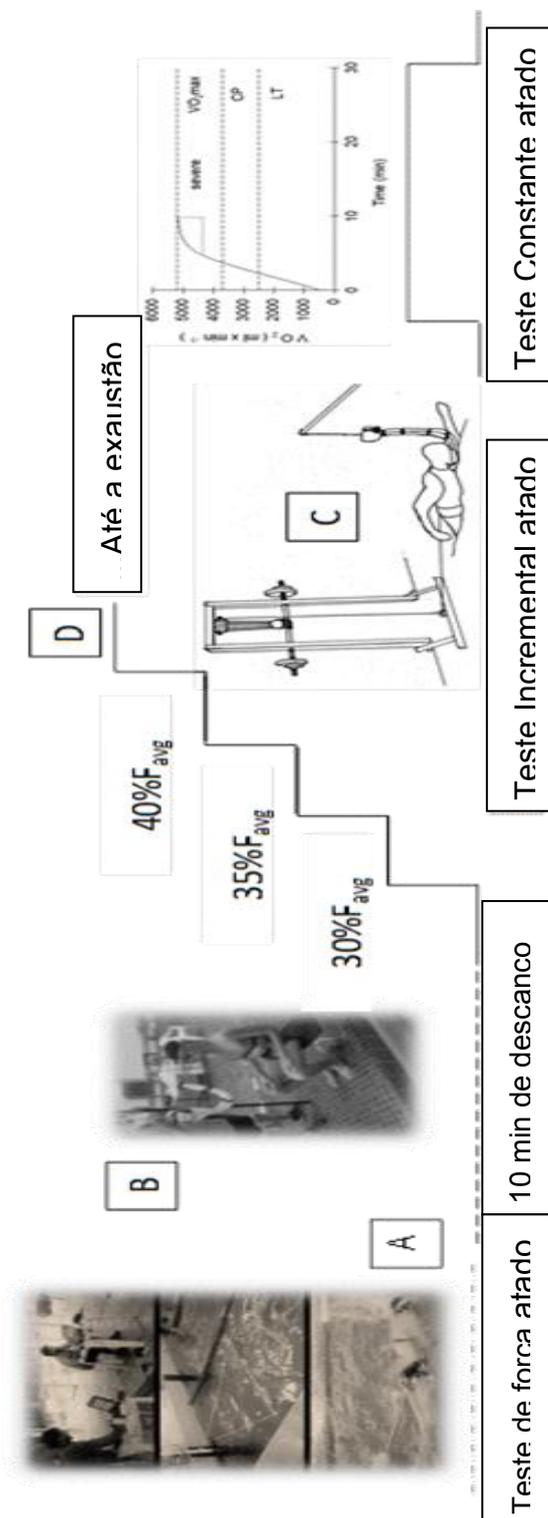


Figura 2: Ilustração no teste de força atada com a célula de carga (A), utilização do novo Aquatrainer (B), aplicação do sistema de roldana com carga no sistema de nado atado (C), visão geral do protocolo incremental (D), e análise da cinética do VO_2 em um protocolo de teste constante no nado atado (E)

O maior valor do VO_2 mensurado respiração-a-respiração, suavizado (filtro de 3s) e médio (intervalos de 9 segundos) foi considerado o $\text{VO}_{2\text{max}}$. Os limites (superior e inferior) para o domínio pesado do exercício foram determinados pelas respostas gasosas, obtendo-se LPG e PCR, respectivamente, conforme as recomendações de Beaver et al. (1986): LPG e PCR foram examinado visualmente, usando as respostas dos parâmetros $V_E/V\text{CO}_2$, $V_E/V\text{O}_2$, $P_{\text{ET}}\text{CO}_2$ e $P_{\text{ET}}\text{O}_2$. Os critérios para determinar o LPG foram: aumento na curva da relação $V_E/V\text{O}_2$ e na $P_{\text{ET}}\text{O}_2$, sem alteração da relação $V_E/V\text{CO}_2$ e na $P_{\text{ET}}\text{CO}_2$. Para PCR: aumento concomitante e sustentado dos parâmetros $V_E/V\text{O}_2$ e $V_E/V\text{CO}_2$, concomitante à diminuição da $P_{\text{ET}}\text{CO}_2$. Os pontos de localização de LPG e PCR foram detectados por dois observadores independentes. A $i\text{VO}_{2\text{max}}$ foi considerada como sendo a menor carga durante o teste incremental na qual ocorreu o $\text{VO}_{2\text{max}}$ (BILLAT et al., 1996). O mesmo critério foi adotado para determinar $i\text{LPG}$ e $i\text{PCR}$.

Durante o teste progressivo em nado atado, o critério de exaustão foi o momento em que o nadador não conseguiu manter-se em equilíbrio com a carga e, por isso, foi tracionado por ela. Em condições de nado atado progressivo, o teste foi considerado máximo se atender aos critérios ($\text{QR} \geq 1,1$; $\text{FC} \geq 90\% \text{FC}_{\text{max}}$ e $\text{lactato} \geq 8 \text{ mmol.L}^{-1}$) de esforço máximo em protocolos progressivos (POOLE et al., 2008). A coleta de sangue foi realizada imediatamente após o teste, sendo seguidos os mesmos procedimentos de coleta e análise descritos no item 3.4. A FC foi registrada usando um frequencímetro (POLAR[®]) que esteve acoplado ao sistema de avaliação

(*snorkel*), registrada juntamente os com gases pelo sistema automatizado portátil (K4b², Cosmed).

4.6. Protocolo de teste constante

Para confirmação do $VO_2\text{max}$, realizou-se duas transições repouso-exercício em intensidade constante na $iVO_2\text{max}$, até o limite máximo de tolerância voluntária. Para a avaliação da carga crítica ($\text{CargaCrítica}_{\text{Atada}}$) pelo modelo impulso-tempo limite ($i-t_{\text{Lim}}$) em nado-atado, outros dois testes de cargas constantes foram realizados, em intensidade variando 5% acima e abaixo da $iVO_2\text{max}$. O critério de exaustão adotado foi o mesmo que aquele descrito para o protocolo incremental (3.5). Durante os testes, a permuta gasosa pulmonar foi determinada respiração-a-respiração, empregando os mesmos procedimentos e equipamentos descritos no item 3.5. A coleta de sangue foi realizada imediatamente após o teste, e o registro da FC também seguiram os mesmos procedimentos e equipamentos descritos no item 3.5.

O VO_2 obtido respiração-a-respiração foi alinhado ao tempo de cada transição, nas duas transições analisadas, para a análise da cinética do VO_2 . Em seguida, cada curva de resposta foi inspecionada manualmente para a exclusão de pontos extremos, que representam eventos fisiológicos não característicos da resposta do VO_2 em exercício (OZYENER et al., 2001). Estes pontos foram definidos como desvios maiores que três desvios-padrões da média local (4–5 respirações) (WHIPP et al., 2005). Posteriormente, os dados foram interpolados para fornecer valores a cada segundo para cada sujeito, em cada transição, e então, obtida a média das transições para fornecer uma única resposta em cada intensidade analisada (CARTER et al.,

2002). A descrição matemática da cinética do VO_2 nas transições foi realizada empregando o modelo de resíduos, a partir do ajuste mono-exponencial sem tempo de início da resposta (TD) (Equação 1). Após a análise dos resíduos, a resposta do componente primário foi isolada e ajustada por outra equação mono-exponencial com tempo de início da resposta (TD) (Equação 2). A Equação 2 forneceu a amplitude primária (A_1), tempo de início da resposta (TD_1) e constantes de tempo (τ_1) do componente primário, nas velocidades analisadas. O componente cardiodinâmico inicial foi ignorado, eliminando-se os 20s iniciais da resposta ao exercício (OZYENER et al., 2001). A linha de base do VO_2 foi definida como a média do VO_2 medido durante 120s de repouso, antes do início de cada transição, em cada condição de nado.

$$VO_2(t) = VO_{2b} + A_1 \left[1 - e^{-t/\tau} \right] \quad (5)$$

$$VO_2(t) = VO_{2b} + A_1 \left[1 - e^{-(t-TD_1)/\tau_1} \right] \quad (6)$$

O aumento fisiologicamente relevante do VO_2 é a amplitude da fase I (A_1'), ou componente "primário" da resposta, que deve refletir estritamente a cinética de extração do O_2 pelo músculo esquelético, que foi determinado a partir:

$$A_1' = A_1 \left(1 - e^{-(TD_2 - TD_1)/\tau_1} \right) \quad (7)$$

onde TD_2 representou o tempo de início do CL, ou final da resposta do componente primário, analisado como o momento (tempo), a partir do qual, os valores observado de VO_2 tornavam-se diferentes daqueles estimados pela Equação 1. Dado que o valor da assíntota da fase II (A_2) pode representar um valor maior que aquele realmente alcançado no final do exercício, o valor do

VO₂ do CL foi definido como a subtração algébrica entre A₁' e o VO₂ ao final do exercício (VO₂EE, média de 15s).

4.7. Análises estatísticas

Os valores obtidos foram apresentados em torno da média e desvio padrão. O teste de A análise pela função monoexponencial, com e sem TD, foi realizada pelo método dos quadrados mínimos residuais. Em todos os níveis, o índice de significância foi pré-fixado em $p \leq 0.05$. Todas as análises foram realizadas no programa estatístico SPSS 18.0[®] e OriginPro 8[®].

5. RESULTADOS

5.1. *Teste progressivo atado (ITT)*

Os valores da capacidade e potência aeróbia, obtidos através do teste incremental máximo em nado atado são apresentados na Tabela 1. A média do VO_2max dos nadadores foi de $50.0 \pm 6.0 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ ($52.1 \pm 5.3 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ para os homens, e $45.4 \pm 6.0 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ para as mulheres) e relativo a massa isenta de gordura foi de $63.8 \pm 6.7 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ ($64.2 \pm 7.6 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ para homens, e $62.8 \pm 6.1 \text{ ml}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ para mulheres). Critérios utilizados para validar o VO_2max ao final do protocolo de nado atado são RER (1.1 ± 0.1), FC ($92.9 \pm 4.2\%$ FCmax), lactato sanguíneo ($7.3 \pm 1.4 \text{ mmol} \times \text{l}^{-1}$). As respostas médias individuais e do grupo do VO_2 e FB do aumento da carga nas etapas submáxima à máxima apresentaram padrões de progressão polinomial de segunda ordem (Figura 2A-D). Etapas de 30-70% da F_{maxatada} apresentaram os seguintes valores: $2.7 \pm 0.6 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($2.9 \pm 0.6 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$ para os homens, e $2.3 \pm 0.3 \text{ N}\cdot\text{kg}^{-1}$ para as mulheres) e foram capazes de eliciar de 40 a 100 % da resposta do VO_2 . As respostas dos parâmetros da permuta gasosa pulmonar durante o teste incremental de nado atado foram apresentadas na Figura 3. A partir da Figura 3, os limites inferior e superior da pressão intrapulmonar foram encontrados para a observação das respostas gasosas (LPG e PCR) e ambas foram claramente perceptíveis.

Tabela 1: Média dos valores aeróbios máximos e submáximos avaliados no teste incremental de nado atado.

	Total (n=16)	Homens (n=11)	Mulheres (n=5)
VO ₂ max (ml × min ⁻¹)	3410,5 ± 575,8	3720,4 ± 426,4	2728,6 ± 161,7
iVO ₂ max (N)	87,8 ± 14,1	93,9 ± 12,2	74,3 ± 6,5
LPG (ml × min ⁻¹)	2187,8 ± 434,8	2440,7 ± 347,3	1717,8 ± 160,6
LPG (%VO ₂ max)	67,3 ± 6,9	67,9 ± 7,4	66,0 ± 6,2
iLPG (N)	54,1 ± 12,1	59,8 ± 9,8	42,1 ± 8,9
iLPG (%iVO ₂ max)	64,8 ± 7,8	62,7 ± 4,3	63,6 ± 2,3
PCR (ml × min ⁻¹)	3000,1 ± 567	3348,7 ± 427,2	2380,8 ± 196,5
PCR (%VO ₂ max)	87,5 ± 3,3	87,7 ± 3,6	87,2 ± 2,9
iPCR (N)	76,7 ± 13,3	83,3 ± 11,7	63 ± 6,2
iPCR (%iVO ₂ max)	85,2 ± 2,7	85,2 ± 2,9	85,3 ± 2,7

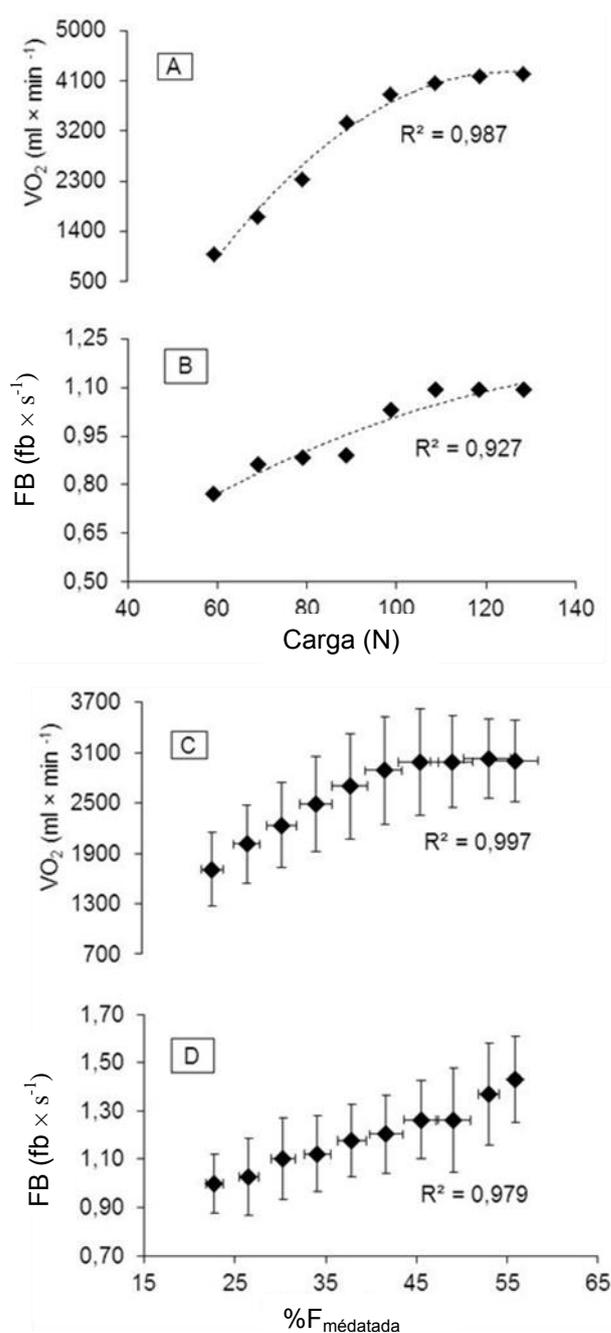


Figura 3: Perfil da resposta do VO₂ e Frequência de Braçada (FB) durante o teste incremental de nado atado Individual (A e B) e média do grupo (C e D). As linhas de tendência foram melhor ajustadas para (A) $VO_2 = -0.7857x^2 + 196.89x - 8076.9$; (B) $FB = -0.00003x^2 + 0.0113x + 0.2147$; (C) $VO_2 = -1.5017x^2 + 158.18x - 1135.5$; e (D) $FB = 0.0001x^2 + 0.004x + 0.8607$.

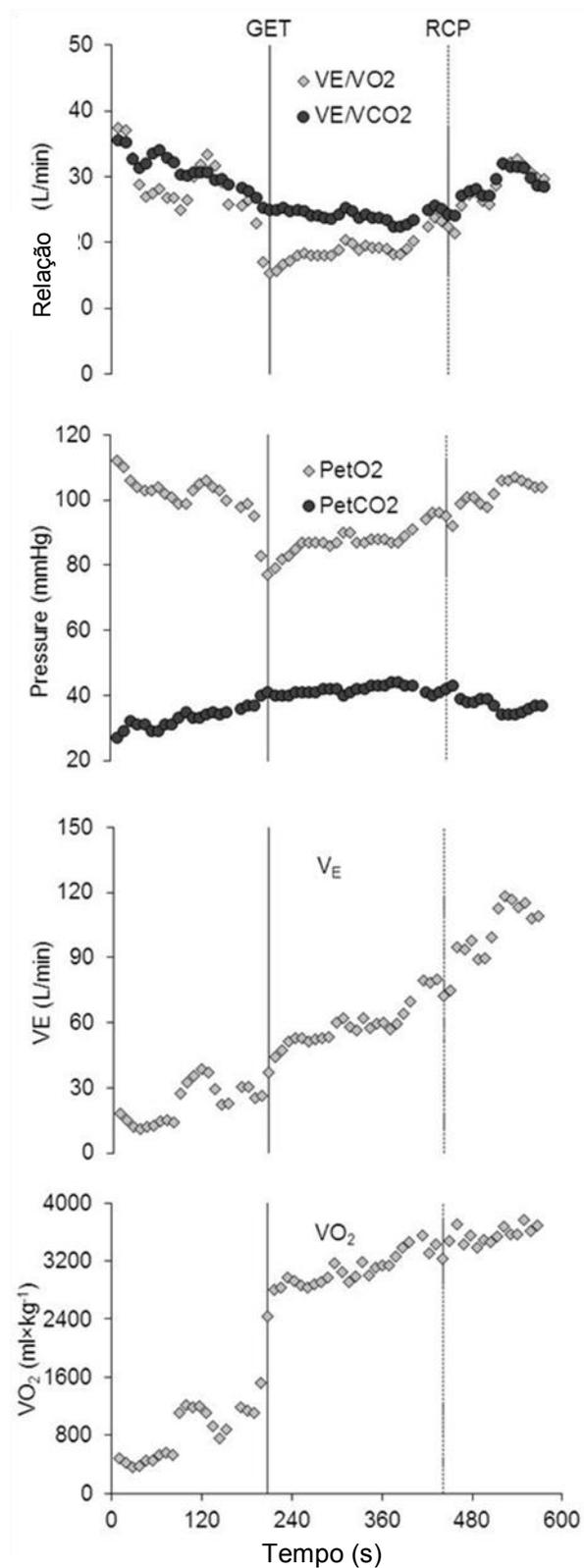


Figura 4: Resposta da permuta gasosa durante um teste incremental de nado atado e determinação dos limiares para um nadador masculino.

5.2. Análise da cinética do VO_2

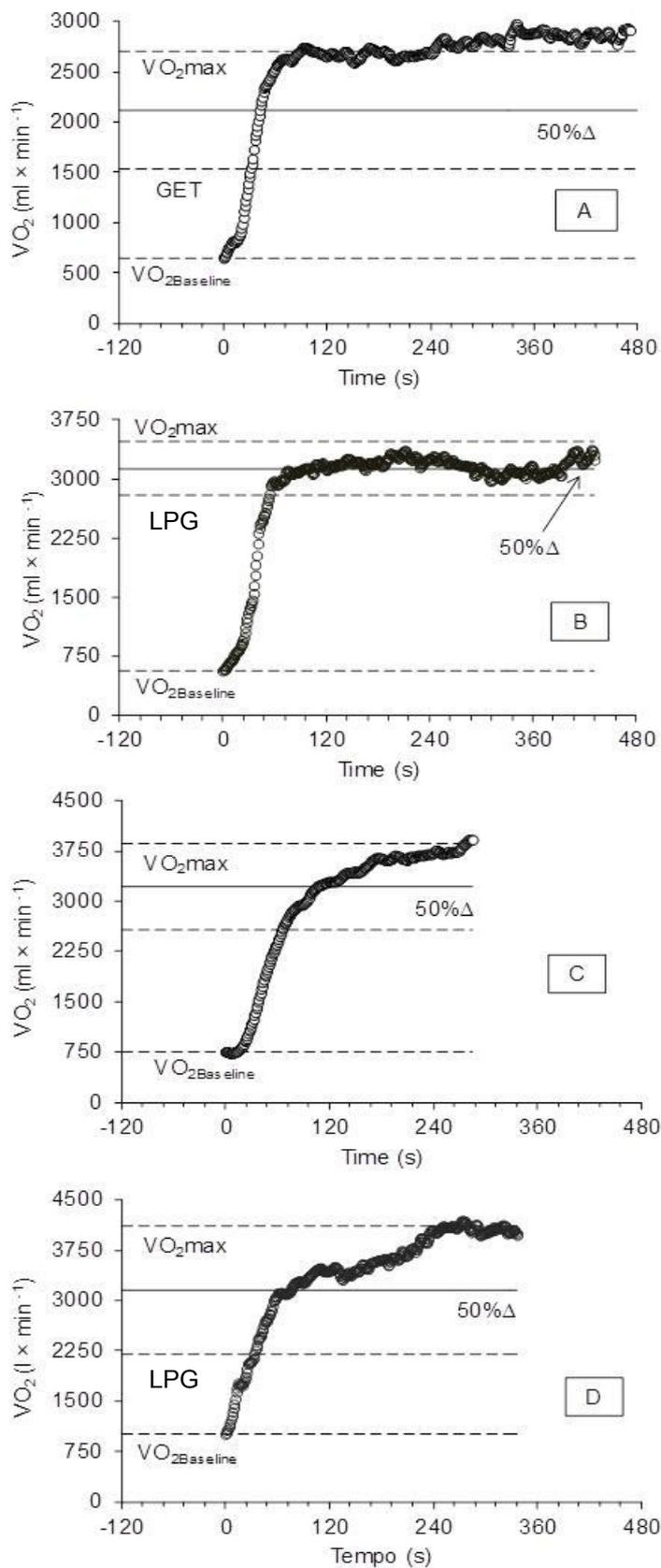
O melhor tempo de tolerância ao exercício na transição entre o repouso e o exercício a 100% da $iVO_2\text{max}$ foi (homens: 329.8 ± 95.4 -s; mulheres: 407.8 ± 73.5 -s), atingindo a média de $100.3 \pm 4.1\%VO_2\text{max}$ (observar na Tabela 2 a diferença entre os sexos) e mostrou correlação negativa com $VO_2\text{max}$ absoluto (-0.66 ; $p = 0.006$), $iVO_2\text{max}$ (-0.77 ; $p = 0.001$) e A_1' (-0.73 ; $p = 0.001$). Todos os nadadores atingiram o $VO_2\text{max}$ a partir da resposta primeira ou do componente lento (CL), e apenas três nadadores não apresentaram CL após a resposta primária do VO_2 ao atingirem os valores máximos obtidos nos testes incrementais atados. A Figura 4 ilustra as duas formas de respostas da cinética do VO_2 durante o nado atado em $iVO_2\text{max}$. Parâmetros de tempo e amplitudes para a cinética do VO_2 na $iVO_2\text{max}$ foram apresentados na Tabela 2, com time-delay para o componente primário (TD_1) e apresentando valores mais elevados, apesar de não diretamente relacionados a constante de tempo para o componente primário do VO_2 (τ_1). A amplitude para a fração do componente primário (A_1) foi atingido em $93.1 \pm 6.8\%VO_2\text{max}$ (homens: $92.9 \pm 7.9\%VO_2\text{max}$; mulheres: $93.7 \pm 4.0\%VO_2\text{max}$) que foi acima do PCR (Tabela 1), bem como, acima de $50\% \Delta LPG - VO_2\text{max}$ (Grupo: $\pm 82.4 \pm 4.0\%VO_2\text{max}$; Homens: $82.8 \pm 4.3\%VO_2\text{max}$; Mulheres: $81.6 \pm 3.5\%VO_2\text{max}$) Além disso, o valor médio de lactato sanguíneo obtido nos testes realizados em $iVO_2\text{max}$ foi de $7.4 \pm 1.9 \text{ mmol} \times \text{l}^{-1}$ (Homens: $7.5 \pm 1.8 \text{ mmol} \times \text{l}^{-1}$ e Mulheres: $7.4 \pm 2.4 \text{ mmol} \times \text{l}^{-1}$). O déficit de oxigênio durante a transição pelo $iVO_2\text{max}$ atinge $1.726,0 \pm 591,9 \text{ ml} \times \text{min}^{-1}$ (Masculino : $1933,4 \pm 602,3 \text{ ml} \times \text{min}^{-1}$; Feminino : $1269,7 \pm 168,7 \text{ ml} \times \text{min}^{-1}$). O déficit de oxigênio

durante a transição pelo $i\text{VO}_2\text{max}$ atinge $1726.0 \pm 591.9 \text{ ml}\times\text{min}^{-1}$ (homens: $1933.4 \pm 602.3 \text{ ml}\times\text{min}^{-1}$; mulheres: $1269.7 \pm 168.7 \text{ ml}\times\text{min}^{-1}$).

Tabela 2: Parâmetros da cinética do VO_2 durante um teste de nado atado na $i\text{VO}_2\text{max}$.

	Total (16)	Homens (11)	Mulheres (5)
$\text{VO}_{2\text{Baseline}}$ ($\text{ml}\times\text{min}^{-1}$)	647.6 ± 126.9	657.7 ± 115.2	625.2 ± 162.1
TD_1 (s)	17.7 ± 5.1	18.0 ± 5.1	17.2 ± 5.5
τ_1 (s)	22.7 ± 8.0	22.9 ± 9.5	22.2 ± 3.8
A_1' ($\text{ml}\times\text{min}^{-1}$)	3173.8 ± 527.3	3453.7 ± 355.1	2557.9 ± 193.6
r^2	0.97 ± 0.02	0.97 ± 0.02	0.98 ± 0.00
TD_2 (s)	146.0 ± 32.2	136.9 ± 30.1	166.0 ± 30.1
CL ($\text{ml}\times\text{min}^{-1}$)	315.5 ± 187.1	394.2 ± 202.6	189.4 ± 30.2
$\%\text{VO}_2\text{EE}$	11.0 ± 4.6	12.3 ± 5.6	8.9 ± 1.2
VO_2EE ($\text{ml}\times\text{min}^{-1}$)	3424.8 ± 566.0	3732.7 ± 364.8	2747.3 ± 184.9
$\%\text{VO}_2\text{max}$	100.7 ± 4.0	100.9 ± 4.9	101.0 ± 3.8

Figure 5: Três padrões de respostas observados no VO_2 durante o nado atado em teste na iVO_2max entre os nadadores. Painel A (primeira resposta rápida com componente lento e contínua até VO_2max), B (resposta inicial rápido fixada no VO_2max), e C (resposta inicial rápida atingindo um platô, com o segundo aumento provocando VO_2max próximo do limite de tolerância).



6. DISCUSSÃO

Neste estudo pode-se comprovar que o nado-atado fornece um contexto capaz de estimular diferentes condições fisiológicas, pelo gerenciamento de cargas externas. Dessa forma, permitiu avaliar a aptidão aeróbia, fornecendo índices fisiológicos máximos e submáximos, tal como o controle da velocidade de nado desimpedido é capaz de contextualizar. Além disso, a cinética do VO_2 durante domínio severo de nado atado apresenta constantes de tempo e amplitude de VO_2 alinhados para a maioria dessas respostas já descritas para o nado livre (não-atado) no mesmo domínio de intensidade. Assim, a resposta cardiorrespiratória durante as condições atada e livre de nado puderam ser observadas, corroborando os resultados anteriores de Holmér (1979), Bonen et al. (1980), e Rinehardt et al (1991).

6.1. *Potência aeróbia máxima*

Apesar de a maioria dos protocolos incrementais destinados a avaliar a capacidade aeróbia durante o nado livre ter duração acima de um minuto, pois trabalhavam com distâncias fixas, variando de 200m a 800m (VAN HANDEL et al., 1988; BENTLEY et al., 2005; ROELS et al., 2009; DEKERLE et al., 2009; PESSOA FILHO, et al., 2012, FERNANDES et al., 2012; SOUZA et al., 2014), ou com duração de tempo de 2 a 6 minutos (HOLMÉR et al., 1974; PENDERGAST et al., 1986; KLENTROU; MONTPETIT et al., 1991; RINEHARDT et al., 1991; TERMIN et al., 2000; ASPENES et al., 2009), o valor médio encontrado do VO_{2max} é de $45 - 70 \text{ mlO}_2 \times \text{kg}^{-1} \times \text{min}^{-1}$, de acordo com as diferenças de sexo, nível de desempenho, especificidade do treinamento, e

método de tratamento de amostra do VO_2 . A partir de estudos que aplicaram o nado atado como ergômetro para controlar a intensidade da carga, cada etapa teve tempo de duração que variam de 30-s a 240-s (MAGEL et al., 1975, BONEN et al., 1980, KIMURA et al., 1990, RINEHARDT et al., 1991, PINNA et al., 2013, PAPOTI et al., 2013) e valores de VO_{2max} de 46 a 67 $mlO_2 \times kg^{-1} \times min^{-1}$. Já o canal de nado, quando usado como ergômetro cada fase teve duração de 30-s a 60-s e valores de VO_{2max} aproximadamente ~50 – 54 $mlO_2 \times kg^{-1} \times min^{-1}$ (NOMURA, 1988; WAKAYOSHI et al., 1995; DEMARIE et al., 2001). Todos esses resultados de VO_{2max} , de protocolos de nado livre e atado, estão bem alinhados com os valores apresentados no presente trabalho (42 a 57 $mlO_2 \times kg^{-1} \times min^{-1}$) corroborando e proporcionando ao nado atado similaridade ecológica como forma de análise do VO_{2max} e garantindo a confiabilidade do atual protocolo de teste atado incremental construído para assistir a este propósito.

6.2. Marcadores submáximos de capacidade aeróbia

Na presente pesquisa, foram determinados parâmetros submáximos de função aeróbia, como limites fisiológicos avaliados a partir de métodos de análise da permuta gasosa, ou seja, o limite inferior (LPG) e superior (PCR) (Figura 3). Trabalhos pioneiros sugeriram que LPG e PCR estariam em torno de 55% e 75% do VO_{2max} com algumas variações entre os exercício (REINHARD et al., 1979; BEAVER et al., 1986; WHIPP et al., 1989). No entanto, uma gama mais ampla ($\pm 15\%$ do VO_{2max}) tem sido associada a esses marcadores (LPG e PCR), uma vez que existe um grande conjunto de critérios associado a uma maior visualização deles (DAVIS et al., 1976;

CAIOZOO et al., 1982; AMANN et al., 2006; BINDER et al., 2008), ao lado da influência do protocolo, estado de treinamento, nível de habilidade, sexo e idade (DAVIS et al., 1976; SCHEURMANN; KOWALCHUK, 1998; BENTLEY et al., 2007; WHIPP, 2007). Na natação, os marcadores fisiológicos submáximos relacionados a LPG e PCR seguem a mesma tendência que a observada para o exercício terrestre acima mencionado. Estudos baseados em ambos os critérios, parâmetros ventilatórios ou concentração de lactato sanguíneo $[La^-]$, apresentaram uma ampla variação (65 a 80%) em relação à velocidade aeróbia máxima (VAM) relacionada ao GET ou limiar de lactato (LL, ou seja, o aumento abrupto sustentado no sangue $[La^-]$ acima dos valores de repouso) (WAKAYOSHI et al., 1992; REIS et al., 2012). Com os trabalhos de Roels et al. (2009), Reis et al. (2011), e Pessoa Filho et al. (2012) apresentam valores de informação um pouco acima de 80% do VAM. Para PCR ou limiar anaeróbio (LAN , ou seja , índice do aumento exponencial de $[La^-]$ no sangue, ou a interpolação para um valor fixo de $[La^-]$ no sangue) foram reportados com intervalo de 70% a 90% da VAM (WAKAYOSHI et al. 1995; FERNANDES et al., 2003; FERNANDES et al., 2006; FERNANDES et al., 2011; PESSÔA FILHO et al., 2012). No nado atado, o LL determinado por Pinna et al. (2013) utilizando o método V-slope (VCO_2 vs VO_2) apresentou um valor em torno de 82% da carga máxima (W) alcançada durante o teste incremental de nado atado, que é cerca de 20% maior do que a determinada para LPG no presente trabalho.

Curiosamente, o VO_2max ($\sim 54 \text{ ml} \times \text{kg}^{-1} \times \text{min}^{-1}$) e a carga de trabalho incremental máximo ($8.9 \text{ kg} \times \text{m} \times \text{min}^{-1}$) são semelhantes aos encontrados no presente trabalho ($\sim 50 \text{ ml} \times \text{kg}^{-1} \times \text{min}^{-1}$ e $\sim 88\text{N}$). Provavelmente o

condicionamento físico e o nível técnico da amostra tenha influenciado no custo submáximo da braçada (TOUSSAINT, 1990; REIS et al., 2012) e os procedimentos matemáticos inerentes ao método V-slope (AMANN et al., 2006) podem explicar as diferenças. Por outro lado, o Lan foi reportado em 75% da $iVO_2\text{max}$ (PAPOTI et al., 2013), que é uma intensidade de carga de trabalho menor do que a observada para o PCR no presente trabalho (Tabela 1). Apesar dos valores desses autores terem apresentado uma maior variabilidade ($\sim 21\%$) para a carga em LAN, o $VO_2\text{max}$ absoluto ($\text{ml}\times\text{kg}^{-1}\times\text{min}^{-1}$) foi semelhante ao encontrado em nosso estudo nos sujeitos masculinos e femininos. Então, a diferença de quase 14% em relação ao presente trabalho pode ser explicada pela maior $iVO_2\text{max}$, menor duração entre as etapas do protocolo, a variável fisiológica e o critério adotado (AMANN et al., 2006; BURNLEY ; JONES, 2007; BENTLEY et al., 2007). O presente trabalho mostrou que os marcadores dos limiares foram localizados (ver Quadro 1 e Figura 3) na faixa semelhante aos encontrados nas condições de natação livre, mas mais alinhada com os dados de Pessoa Filho et al (2012) que os marcadores para LPG (70% $VO_2\text{max}$) e PCR (86% $VO_2\text{max}$) que foram avaliados no nado livre, seguindo a mesma variáveis, critérios, e aparelhos para a obtenção da amostra de gás. Portanto, o presente trabalho sugere que a taxa metabólica não difere em marcadores fisiológicos submáximos comparáveis entre o nado livre e o nado atado, compreendendo as mudanças na taxa de demanda aeróbia e anaeróbia, via a uma dada intensidade de exercício, enquanto nadando em cada condição, devido aos parâmetros supracitado utilizados para a avaliação do $VO_2\text{max}$ e $\%VO_2\text{max}$ sustentado em cada região limítrofe de acidose metabólica. Assim, a questão de saber se é a

diferença na hidrodinâmica da braçada (GOURGOULIS et al., 2013) que prejudica as comparações fisiológicas e, conseqüentemente, restringir a transferência de melhorias de desempenho entre os nadadores, não foi suportada. No entanto, ele continua a ser observada diretamente a partir da análise dos mesmos indivíduos em ambas as condições, mas o presente trabalho não avaliou nadadores no nado livre. Apesar das semelhanças apresentadas acima, o perfil de VO_2 crescente com incrementos de carga de trabalho segue uma relação polinomial de segunda ordem (Figura 2), que diferem de relação cúbica entre VO_2 e velocidade do nado livre (WAKAYOSHI et al., 1995; . TOUSSAINT et al., 1990 ; TOUSSAINT ; HOLLANDER , 1994). Provavelmente, isso ocorre devido a ausência de arrasto ativo durante o nado atado, embora a mudança no perfil (cúbico para polinomial de segunda ordem) pode demonstrar uma mudança na inclinação da relação VO_2 versus intensidade de exercício. Como sugerido por Wakayoshi et al (1995), uma menor inclinação iria refletir uma diminuição na FB e do VO_2 em determinada intensidade de nado, ou mesmo , uma melhoria na eficiência de braçada (TOUSSAINT et al. ,1990).No entanto, um uso econômico do VO_2 parece ser contornado com uma maior intensidade de nado, pois as formas cúbica e polinomial de segunda ordem diferem principalmente na fase final do perfil. Este, por sua vez, ajuda a explicar as semelhanças nas taxas submáximas de demanda oxidativa obtidas em teste atado, quando comparado aos valores reportados para o nado livre, bem como das taxas máximas, porque o consumo máximo de oxigênio do teste incremental é melhor relacionado à fatores locais e central associados a capacidade oxidativa muscular do que a economia de

movimento (WAKAYOSHI et al., 1995, BANGSBO, 2000; BURNLEY and JONES, 2007; UNNITHAN et al., 2010).

6.3. Tolerância de nado e cinética do VO_2 na iVO_{2max}

As variáveis fisiológicas relacionadas ao desempenho de endurance no nado livre são a taxa máxima oxidativa, a taxa de aumento do VO_2 para uma dada demanda da taxa metabólica muscular, tolerância tempo no VO_{2max} e economia (TOUSSAINT; HOLLANDER, 1994). O tempo de tolerância na iVO_{2max} do presente estudo apresentou semelhança aos valores de vVO_{2max} (314 a 375-s) para nadadores com alto valor de VO_{2max} ou alto nível técnico (DEMARIE et al., 2001; FERNANDES et al., 2006). Entretanto, nadadores com altos valores de potência aeróbia ($>70 \text{ mlO}_2 \times \text{kg}^{-1} \times \text{min}^{-1}$) realizaram performances em vVO_{2max} até a exaustão com uma vasta gama de tolerância de tempo (188 a 400-s; FERNANDES et al., 2003) e nadadores com valores médios de VO_{2max} ($\sim 60 \text{ mlO}_2 \times \text{kg}^{-1} \times \text{min}^{-1}$) tiveram tolerância de tempo a baixo de 200-s (SOUSA et al., 2014) ou acima de 300-s (FAINA et al., 1997) evidenciando que os valores obtidos no nado atado no presente estudo (197 a 496-s considerando todos os sujeitos) se encaixam bem com valores de tolerância de tempo em vVO_{2max} relatado no nado livre e no canal de nado. Até a data, a tolerância de tempo durante o nado atado em iVO_{2max} foi relatado (409 ± 101.3 -s) nos desempenhos nos testes com a de carga crítica estimada (PAPOTI, et al., 2013), que teve um valor médio superior ao observado no presente trabalho. A diferença média entre o tempo de tolerância pode ser atribuído ao maior iVO_{2max} ($\sim 24\%$) dos nossos nadadores, quando comparado ao $\sim 77N$ do trabalho citado. Como os autores citados não

informaram resposta VO_2 durante os testes na iVO_2max , nenhuma outra comparação é possível.

O valor observado para o tempo de tolerância no presente trabalho foi o menor tempo obtido nos testes realizados na iVO_2max em duas realizações, e os valores da resposta do VO_2 foram analisados para se obter a média à partir dos dois testes. Consequentemente, os dados registrados de durante as coletas reduziram as limitação e os ruídos do sinal para a confiabilidade do teste em relação aos parâmetros de cinética de VO_2 (CARTER et al., 2010). Então, a supõe-se que relação entre tempo de tolerância no VO_2max com a máxima intensidade de exercício (vVO_2max , $r = -0,47$ a $-0,72$) pode ser corroborada pelo nado atado, apoiando a suposição de que uma maior velocidade máxima aeróbia não prolonga a tolerância ao exercício (natação) (FERNANDES et al., 2006; FERNANDES et al., 2008; SOUSA et al., 2014). Apesar de outros trabalhos não terem obtido sucesso em demonstrar valores de significância ($r = -0,16$ para $-0,35$) para a correlação de tempo de tolerância para qualquer taxa oxidativa máxima, seja ela absoluta ou relativa ($\text{IO}_2 \times \text{min}^{-1}$ ou $\text{mlO}_2 \times \text{kg}^{-1} \times \text{min}^{-1}$) (FAINA et al., 1997; FERNANDES et al., 2006), no presente estudo foi observado somente para valores absolutos, como mostrado no nado livre ($r = -0,54$ a $-0,62$, FERNANDES et al., 2003 e 2008), ciclismo ($r = -0,46$, FAINA et al., 1997) e corrida ($r = -0,75$, BILLAT et al., 2003). Assim, há uma tendência da carga aeróbia máxima no nado atado (como carga ou velocidade em outra condição de nado e esportes) à tolerância influenciada pelo VO_2max . Mesmo as correlações de tempo de tolerância na iVO_2max com intensidade de nado em limiares metabólicos submáximos (iLPG : $r = -0,67$, $p < 0,01$; e iPCR : $r = -0,76$, $p < 0,01$) bem como, com a taxa oxidativa absoluta

nesses marcadores de limiar (VO_2LPG : $r = -0,57$, $p < 0,05$; e VO_2PCR : $r = -0,64$, $p < 0,01$) foram constatados no nado atado. Resultado semelhante foi relatado em nado livre entre velocidade e LAn (por método da curva de lactato, $r = -0.54$ a -0.62) no trabalho de Fernandes et al.,(2003 e 2008). Isso não é uma novidade inesperada, pois há uma tendência que quanto maior o VO_2max , mais elevado são os marcadores de oxidação submáximas para os limiares obtidos através dos métodos de permuta gasosa. A perspectiva observado acima sobre as taxas oxidativas máximas e submáximas que limitam a tolerância ao exercício em VO_2max foi apoiada pela interpretação das informações periféricas das vias oxidativas (VO_2 pulmonar) e a sua interação com a ativação anaeróbia e o processo relacionado (concentração de lactato sanguíneo e o mecanismo de tamponamento). No entanto, a análise do perfil de VO_2 pelo modelo da cinética VO_2 tem proporcionado pressupostos importantes para ambas as respostas do metabolismo O_2 - dependentes e não dependentes durante o exercício em diferentes domínios de intensidade do exercício O desempenho no domínio severo (ou seja, acima da potência crítica, P_{crit}), inclui uma ampla gama de intensidade do exercício para atingir a taxa máxima do VO_2 , e o aumento contínuo do lactato sanguíneo (BURNLEY e JONES, 2007). Da teoria sistema de controle, isso significa que uma falha na tentativa de se elevar o volume da demanda energética oxidativa para corresponder a demanda global de energia durante o exercício, e como contribuição da finita reserva de energia anaeróbica para o aumento gradual, a exaustão pode ser atribuído à perturbação metabólica, devido ao acúmulo de metabolitos e depleção de substratos intramusculares (BURNLEY and JONES, 2007; JONES et al., 2010) Assim, durante o exercício em VO_2max a tolerância

estaria relacionada a ambos, tanto com o alto poder oxidativo (incluindo disponibilidade e velocidade de fosforilação do O_2) quanto a capacidade anaeróbia (FAINA et al., 1997; DiPRAMPERO, 2003; JONES et al., 2010).

Portanto, o cenário mais provável para a resposta VO_2 associado à tolerância durante o exercício severo é: (i) rápida resposta primária (curto MRT ou τ) tende a projetar o VO_2 para uma amplitude (A^1) próximo ao VO_2 necessário, evitando que ocorra um alto déficit de oxigênio no início do exercício e uma sobrecarga prematura de glicólise anaeróbia; (ii) um controle superior da homeostase ácido-base, impedindo a prematura perturbação do músculo e do ambiente de sanguíneo, bem como, a depleção do substrato energético muscular; e (iii) ampla janela para o CL se manifestar (ou seja, o $\%VO_{2max}$ no PCR ou $50\% \Delta VO_{2max-LPG}$) e ajustando o fornecimento de VO_2 e da taxa oxidativo para atender à demanda energética necessária para o volume de trabalho de recrutamento das fibras dos tipos oxidativas e glicolíticas (JONES et al., 2010; MURGATROYD, et al., 2011) Estes cenários foram observadas entre os nossos nadadores (ver Figura 4). O Painel A mostrou uma nadadora com tolerância de tempo (471-s) exemplificando o cenário de (i), uma vez que ela apresentou a constante de tempo para a resposta primária (18,2 s), déficit de oxigênio ($1277 \text{ ml}O_2 \times \text{min}^{-1}$), baixa contribuição do CL para o aumento VO_2 durante o exercício (9,0%), bem como o acúmulo da concentração de lactato sanguíneo ($6,7 \text{ mmol} \times \text{l}^{-1}$) que estão todos abaixo da média geral ou específicas de cada sexo (ver resultados do texto ou Tabela 2). Este nadador, como os outros quatro nadadores com perfil semelhante de VO_2 e resposta do lactato sanguíneo, tiveram tolerância de tempo acima de 300-s e abaixo média sexo-específicos para iVO_{2max} e VO_{2max} . Assim, a partir de parâmetros de

controle do VO_2 pulmonar em resposta à demanda energética do músculo, nadadores com capacidade aeróbia moderada não apresentaram taxa limitação oxidativa (perfusão, difusão e capacidade mitocondrial) durante a performance do exercício de alta intensidade. Como sugerido por Wagner (2000) e DiPrampo (2003), a resistência periférica são fatores mais importantes do que a disponibilidade de oxigênio para explicar a tolerância durante o exercício em intensidade aeróbia máxima, em atletas de alto nível.

De outra forma, o Painel B mostrou um nadador masculino com tolerância de tempo semelhante (468-s) a nadadora do Painel A. Esse poderia ser um exemplo de tolerância pelo cenário (ii), uma vez que apresenta constante de tempo para a resposta primária (21,6-s), déficit de oxigênio ($1845 \text{ mlO}_2 \times \text{min}^{-1}$), e baixa contribuição CL para aumento do VO_2 durante o exercício (3,1%), que estão também abaixo da média do grupo geral ou específico do sexo. As diferenças entre eles parecia estar relacionado ao VO_2max ($56,7 \text{ mlO}_2 \times \text{kg}^{-1} \times \text{min}^{-1}$) e ativação glicolítica (lactato sanguíneo: $8,9 \text{ mmol} \times \text{l}^{-1}$), ambos acima da média específica do sexo. Ou seja, uma maior capacidade de suplementação energética anaeróbia ajudou a ampliar o tempo de tolerância, principalmente quando a taxa de oxidação de tende a ser mais elevada; não foi observado nenhum limitante ao aumento do VO_2 no início do exercício, mas depois da resposta primária foi concluída, mais ajustes oxidativos pareciam estar acabados (ou seja, não há espaço para ocorrência do CL). Além disso, as respostas do VO_2 ilustrado no Painel C também foram responsáveis para o papel da capacidade anaeróbia na tolerância ao VO_2max (cenário II). Neste caso, outro nadador masculino mostrou constante de tempo lento (45,8-s) que conduz a elevado déficit de oxigênio ($3223 \text{ mlO}_2 \times \text{min}^{-1}$) com o CL (12.7%)

EEVO₂) e lactato sanguíneo (6.9 mmol×l⁻¹) moderadamente elevado. Como ele tinha a maior VO₂max relativo entre os indivíduos (58.8 mlO₂ × kg × min⁻¹) e a ativação do metabolismo dependente do oxigênio parece ser restrita no início do exercício, como um aparecimento tardio da resposta primária, a tolerância provavelmente está relacionada a capacidade de tempo-dependência glicolítica. Estes resultados corroboram a observação de que a amplitude da resposta primária do VO₂ (A1') está negativamente relacionado (r = -0,729, p <0,01) com o tempo de tolerância, e quanto maior é a tendência da resposta primária, maior será o VO₂max (r = 0,904; p <0,01) e o iVO₂max (0,896; p <0,01) do nadador. O mesmo resultado foi relatado para Faina et al. (1997), analisando o acúmulo do déficit de oxigênio e a tolerância, o que leva os autores a sugerir que o tempo de tolerância sustente uma maior capacidade anaeróbia. Finalmente, o cenário (iii) é, afirmativamente, evidenciado entre os nossos assuntos. Um nadador do sexo masculino que também se apresentou acima de 300-s (Painel D), tinha ainda VO₂max (47.6 mlO₂×kg⁻¹×min⁻¹) e iVO₂max (88.4N) que estão acima da média para valores específicos para sexo. Apesar da constante de tempo para o componente primário ter sido um dos mais elevados (30,6-s) seu déficit mais oxigênio foi um dos mais baixos (1747 mlO₂×min⁻¹) o que está provavelmente relacionado com a menor A1' (84.5% VO₂max) maior CL (18.8%) e contribuição glicolítica (8.2 mmol ×l⁻¹). Mas as correlações de amplitude do CL com tempo de tolerância ativação glicolítica não apresentaram nenhuma significância (r = 0.13 e -0.23; p = 0.62 e 0.39, respectivamente) apoiando os achados de Demarie et al. (2001). Fernandes et al. (2003 e 2008) também constataram que o CL não apresentou relação com a elevação do lactato sanguíneo, no entanto, foi constatado

relação com o tempo de tolerância. Para esses autores, a maior tolerância corresponde a um CL mais alto esperado. As diferenças com o presente trabalho não poderia estar relacionada com as condições de nado (nado atado vs nado livre) porque os parâmetros da cinética do VO_2 aqui apresentados não diferem de outros trabalhos que analisaram o perfil do VO_2 no domínio severo (REIS et al., 2011; PESSOA FILHO et al., 2012; SOUSA et al., 2014) com exceção do time-delay do tempo de resposta, que aparentemente foi um pouco maior. Assim, o nível aeróbio poderia explicar as diferenças, como o VO_{2max} e tolerância são consideravelmente mais elevada e mais baixa, respectivamente, do que a observada entre os nadadores. Infelizmente, estes autores não relataram mais informações referente a cinética do VO_2 , limitando outras comparações. De qualquer forma, Murgatroyd et al. (2011), relacionou a amplitude do CL com uma cascata de mecanismos que induzem à fadiga por acúmulo de metabolitos. A intercepção do modelo potência- t_{Lim} (W') desempenha um papel importante neste modelo de acúmulo, de acordo com os autores, porque depois de um nível crítico de energia liberada de fontes independentes de oxigênio que compreendem W' , a perturbação metabólica é progressiva e leva a uma redução da eficiência de trabalho, depleção de substratos e acúmulo de metabólitos. Como W' é presumivelmente baixo em atletas de *endurance*, intolerância deve ser um fator dependente do tempo sobre a capacidade de ajustar a demanda da taxa oxidativa (CL) para atender os requisitos de energia mecânica.

Finalmente, os altos valores de time-delay para o componente primário sugere um retardado na extração de sinalização de oxigênio muscular do VO_2 pulmonar (JONES et al., 2010). Isto é, o sinal de VO_2 pareceu ser

limitada no início da transição, o que pode ser uma simples manobra de respiração que os nadadores usam para durante o nado a baixas intensidades de cargas de trabalho, ou mesmo uma falha respiratória ambiental imposta pelo espaço morto do sistema de snorkel. Seja qual for o caso, ambas significam reconhecidamente uma limitação ao estudo da permuta gasosa pulmonar durante baixas taxas respiratórias no nado atado.

7. CONCLUSÃO

Quando comparado com os resultados disponíveis na literatura, os resultados obtidos para o perfil de capacidade aeróbia apoia a validade do nado atado como um ergômetro com controle da intensidade do exercício, pelo fácil gerenciamento de carga de trabalho ao longo das etapas incrementais. Apesar da utilização da distância como medida ser um método comum para teste incremental em nado livre, a utilização de etapas baseadas no tempo de teste para a realização do teste incremental atado é viável, garantindo baixo custo, especificidade fisiológica e precisão da medição.

Durante o nado atado realizado na intensidade referente à máxima capacidade aeróbia, o domínio severo do exercício é caracterizado pelo alcance do VO_{2max} diretamente na resposta primária, ou após a ocorrência do componente lento, com as respostas de amplitude temporal garantindo semelhanças fisiológicas (perfil do VO_2 e tempo de tolerância) para o nado livre no mesmo domínio. A magnitude do iVO_{2max} e VO_{2max} foram os principais fatores que limitam a tolerância, mas a cinética do VO_2 vinculada ao desenvolvimento do CL ao longo do tempo, capacidade anaeróbia, déficit de oxigênio reduzida em uma rápida amplitude tempo e o VO_2 constante ou baixo para a resposta primária, a fim de estender o tempo de tolerância ao exercício.

Trabalhos futuros devem investigar se os marcadores de taxa de trabalho submáximo e o perfil oxidativo máxima em nado atado, obtida através da tecnologia respiração-a-respiração, são capazes de apresentar novas percepções sobre a capacidade de desempenho aeróbio, além das já relatadas análises de lactato sanguíneo e análise do consumo de oxigênio pós exercício.

Agradecimentos

O Autor gostaria de agradecer os nadadores da equipe da Associação Bauruense de Desportos Aquáticos (ABDA), bem como , o apoio financeiro do CNPq (479262 / 2013-6)

REFERÊNCIAS

AMANN, M.; SUBUDHI, A.; FOSTER, C. Influence of Testing Protocol on Ventilatory Thresholds and Cycling Performance. **Med. Sci. Sports Exerc.** Vol. 36(4): 613-622, 2004.

AMANN, M.; SUBUDHI, A. W.; FOSTER, C. Predictive validity of ventilatory and lactate thresholds for cycling time trial performance. **Scand J Med Sci Sports.** 16: 27–34, 2006.

AMARO, N.; MARINHO, D. A.; BATALHA, N.; MARQUES, M. C.; MOROUÇO, P. Reliability of Tethered Swimming Evaluation in Age Group Swimmers. **J Human Kinetics.** 41: 155-162, 2014.

ASPENES, S.; KJENDLIE, P-L.; HOFF, J.; HELGERUD, J. Combined strength and endurance training in competitive swimmers. **J of Sport Sci and Med.** 8: 357-365, 2009.

BALDARI C., FERNANDES RJ., RIBEIRO J., MEUCCI M., VILAS-BOAS JP., GUIDETTI L. Is the new AquaTrainer® snorkel valid for VO₂ assessment in swimming? **Int J Sports Med.** 34(4): 336-44, 2013.

BANGSBO, J. Muscle oxygen uptake in humans at onset of and during intense exercise. **Acta Physiol Scand.** (168): 457-464, 2000.

BEAVER WL., WASSERMAN K., WHIPP BJ. A new method for detecting threshold by gas exchange. **J Appl Physiol.** 60(06): 2020-2027, 1986.

BENTLEY, D. J.; NEWELL, J.; BISHOP, D. Incremental Exercise Test Design and Analysis: Implications for Performance Diagnostics in Endurance Athletes. **Sports Med.** 37(7): 575-586, 2007.

BENTLEY, D. J.; ROELS, B.; HELLARD, P.; FRAUQUET, C.; LIBICZ, S.; MILLET, G. P. Physiological responses during submaximal interval swimming training: effects of interval duration. **J Sci Med Sport.** 8(4): 392-402, 2005.

BILLAT, V. L.; LEPRETRE, P. M.; HEUBERT, R. P.; KORALSZTEIN, J. P.; GAZEAU, F. P. Influence of Acute Moderate Hypoxia on Time to Exhaustion at vVO₂max in Unacclimatized Runners. **Int J Sports Med.** 24: 9-14, 2003.

BINDER, R. K.; WONISCH, M.; CORRA, U.; COHEN-SOLAL, A.; VANHEES, L.; SANER, H.; SCHMID, J-P. Methodological approach to the first and second lactate threshold in incremental cardiopulmonary exercise testing. **Eur J Cardiovasc Prev Rehabil.** 15: 726-734, 2008.

BOLLENS, E., ANNEMANS, L., VAES, W., CLARYS, J.P. Periferical EMG comparison between fully tethered and free front crawl swimming. In: UNGERECHTS, B.E., WILKE, K., REISCHLE, K. (eds.) **Swim Sci V.** 18: 173-182, 1988.

BONEN A, WILSON B, YARKONY M, BELCASTRO AN. Maximal oxygen uptake during free, tethered, and flume swimming. **J Appl Physiol.** 48(2): 232-235, 1980.

BURNLEY, M.; JONES, AM. Oxygen uptake kinetics as a determinant of sports performance. **Eur J Sport Sci.** 07(2): 63-79, 2007.

CAIOZZO, V. J.; DAVIS, J. A.; ELLIS, J. F.; AZUS, J. L.; VANDAGRIFF, R.; PRIETTO, C. A.; McMASTER, W. C. A comparison of gas exchange indices used to detect the anaerobic threshold **J. Appl. Physiol: Respirat. Environ. Exercise Physiol.** 53(5): 1184-1189, 1982.

CARTER, H.; JONES, A. M.; MAXWELL, N. S.; DOUST, J. H. The effect of interdiurnal and diurnal variation on oxygen uptake kinetics during treadmill running. **J of Sports Sciences.** 20(11): 901-909, 2002.

CARTER, H., PRINGLE, J.S.M., JONES, A.M., DOUST, J.H. Oxygen uptake kinetics during treadmill running across exercise intensity domains. **Eur J Appl Physiol.** 86: 347-354, 2002.

DAVIS, J. A.; VODAK, P.; WILMORE, J. H.; VODAK, J.; KURT, P. Anaerobic threshold and maximal aerobic power for three modes of exercise. **J Appl Physiol.** 41(4): 544-550, 1976.

DAY, J. R.; ROSSITER, H. B.; COATS, E. M.; SKASICK, A.; WHIPP, B. J. The maximally attainable VO_2 during exercise in humans: the peak vs. maximum issue. **J Appl Physiol.** 95: 1901-1907, 2003.

DEKERLE, J.; BRICKLEY, G.; ALBERTY, M.; PELAYO, P. Characterizing the slope of the distance-time relationship in swimming. **J Sci Med Sport.** 13(3): 365-70, 2010.

DEMARIE, S.; SARDELLA, F.; BILLAT, V. L.; MAGINI, W.; FAINA, M. The VO_2 slow component in swimming. **Eur J Appl Physiol.** 84: 95-99, 2001.

DIMENNA, F. J.; JONES, A. M. "Linear" versus "nonlinear" VO_2 responses to exercise: reshaping traditional beliefs. **Exerc Sci Fit.** 7(2): 67-84, 2009.

DiPRAMPERO, P. E. Factors limiting maximal performance in humans. **Eur J Appl Physiol.** (90): 420-429, 2003.

DOMINGUEZ-CASTELLS, L., ARELLANO, R. Effect of different loads on stroke and coordination parameters during freestyle semi-tethered swimming. **J Human Kinetics.** (32): 33-41, 2012.

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. **Phys Edu Sports.** 1(7): 15-22, 2000.

FAINA, M.; BILLAT, V.; SQUADRONE, R.; ANGELIS, M. De. Anaerobic contribution to the time to exhaustion at the minimal exercise intensity at which maximal oxygen uptake occurs in elite cyclist, kayakers and swimmers. **Eur J Appl Physiol Occup Physiol.** (76): 13-20, 1997.

FERNANDES, R. J.; BILLAT, V. L.; CRUZ, A. C.; COLAÇO, P. J.; CARDOSO, C. S.; VILA-BOAS, J. P. Does net energy cost of swimming affect time to exhaustion at the individual's maximal oxygen consumption velocity? **J Sports Med Phys Fitness.** 46: 373-10, 2006.

FERNANDES, R. J.; CARDOSO, C. S.; SOARES, S. M.; ASCENSAO, A.; COLACO, P. J.; VILAS-BOAS, J. P. Time limit and VO_2 slow component at intensities corresponding to VO_{2max} in swimmers. **Int J Sports Med.** (24): 576-581, 2003.

FERNANDES, R. J.; KESKINEN, K. L.; COLAÇO, P.; QUERIDO, A. J.; MACHADO, L.; MORAIS, P. A. Time limit at VO_{2max} velocity in elite crawl swimmers. **Int J Sport Med.** 29: 145-50, 2008.

FERNANDES, R. J.; FIGUEIREDO, P.; SEIFERT, L.; VILAS-BOAS, J. P. **Kinematics of the Hip and Body Center of Mass in Front Crawl.** 33: 15-23, 2012.

FERNANDES, R. J.; SOUSA, M.; MACHADO, L.; VILAS-BOAS, J. P. Step Length and Individual Anaerobic Threshold Assessment in Swimming. **Int J Sports Med.** 32: 940-946, 2011.

GAYDA, M.; BOSQUET, L.; JUNEAU, M.; GUIRAUD, T.; LAMBERT, J.; NIGAM, A. Comparison of gas exchange data using the Aquatrainer[®] system and the facemask with Cosmed K4b² during exercise in healthy subjects. **Eur J Appl Physiol.** 109: 191-199, 2010.

GOURGOULIS, V.; AGGELOUSSIS, N.; MAVRIDIS, G.; BOLI, A.; KASIMATIS, P.; VEZOS, N.; TOUBEKIS, A.; ANTONIOU, P.; MAVROMMATIS, G. Acute effect of front crawl sprint resisted swimming on the propulsive forces of the hand. **J Appl Biomech.** 29: 98-104, 2013.

HOLMÉR, I. Energetics and Mechanical Work in Swimming. In: HOLLANDER, AP; HUIJING, PA; DeGROOT, G. (eds.) Biomechanics and Medicine in Swimming, **Human Kinetics**, Champaign, IL, 154-164, 1983.

HOLMÉR, I. Physiology of Swimming Man. Exercise Sport Sciences Review: HUTTON; MILLER (eds.). 7:87-123, 1979.

HOLMÉR, I.; LUNDIN, A.; ERIKSSON, B. Maximum oxygen uptake during swimming and running by elite swimmers. **J App Physiol.** 36(6): 711-14, 1974.

HOWLEY, E. T.; BASSETT JR, D. R.; WELCH, H. G. Criteria for maximal oxygen uptake: review and commentary. **Med Sci Sports Exerc.** Madison, 27(9): 1292-1301, 1995.

JACOBS, R. A.; RASMUSSEN, P.; SIEBENMANN, C.; DÍAZ, V.; GASSMANN, M.; PESTA, D.; GNAIGER, E.; NORDSBORG, N. B.; ROBACH, P.; LUNDBY, C. Determinants of time trial performance and maximal incremental exercise in highly trained endurance athletes. **J Appl Physiol** 111: 1422–1430, 2011.

JONES, A. M.; VANHATALO, A.; BURNLEY, M.; MORTON, R. H.; POOLE, D. C. Critical power: implications for determination of VO₂max and exercise tolerance. **Med Sci Sports Exerc.** ed.10, 42: 1876-1890, 2010.

KIMURA, Y.; YEATER R. A.; MARTIN, R. B. Simulated swimming: a useful tool for evaluation the VO₂max of swimmers in the laboratory. **Br J Sp Med.** 24(3): 201-6, 1990.

KLENTROU, P. P.; MONTPETIT, R. R. Physiologic and physical correlates of swimming performance. **J Swim Res.** 07(01): 13-18, 1991.

LUCIA, A.; HOYOS, J.; SANTALLA, M., PEREZ, M.; CHICHARRO, J. L. Kinetics of VO₂ in professional cyclists. **Med Sci Sports Exerc.** 34: 326-331, 2002.

MAGEL, J. R.; FOGLIA, G. F.; McARDLE, W. D.; GUTIN, B.; PECHAR, G. S.; KATCH, F. I. Specificity of swim training on maximum oxygen uptake. **Eur J Appl Physiol.** 38:151-155, 1975.

MAGEL, J. R. Propelling force measured during tethered swimming in the four competitive swimming styles. **Research quarterly** 41(1):68-74, 1970.

MOROUÇO, P.; KESKINEN, K. L.; VILAS-BOAS, J. P.; FERNANDES, R. J. Relationship between tethered forces and the four swimming techniques performance. **J Appl Biomech.** 27: 161-169, 2011.

MURGATROYD, S. R.; FERGUSON, C.; WARD, S. A.; WHIPP, B. J.; ROSSITER, H. B. Pulmonary O₂ uptake kinetics as a determinant of high-intensity exercise tolerance in humans. **J Appl Physiol.** 110: 1598-1606, 2011.

NANA, A.; SLATER, G. J.; HOPKINS, W. G.; BURKE, L. M. Techniques for Undertaking Dual-Energy X-Ray Absorptiometry Whole-Body Scans to Estimate Body Composition in Tall and/or Broad Subjects. **In J of Sport Nutrition and Exerc Metabolism.** 22: 313-322, 2012.

OZYENER, F.; ROSSITER, H. B.; WARD, S. A.; WHIPP, B. J. Influence of exercise intensity on the on- and off-transients kinetics of pulmonary oxygen uptake in humans. **J. Physiol.** 533: 891-902, 2001.

PAPOTI, M.; da SILVA, A. S. R.; ARAUJO, G. G.; SANTIAGO, V.; MARTINS, L. E. B.; CUNHA, S. A.; GOBATTO, C. A. Aerobic and anaerobic performances in tethered swimming. **Int J Sports Med.** 34:712-719, 2013.

PAPOTI, M.; VITÓRIO, R.; ARAÚJO, G. S.; MARTINS, L. E. B.; CUNHA, S. A.; GOBATTO, C. A. Força crítica em nado atado para avaliação da capacidade aeróbia e predição de performances em nado livre. **Rev Bras Cineantropom Desempenho Hum.** 12(1): 14-20, 2010.

PESSÔA FILHO, D. M.; ALVES, F. B.; REIS, J. F.; GRECO, C. C.; DENADAI, B. S. VO₂ Kinetics during heavy and severe exercise in swimming. **Int J Sports Med.** 33: 1-5, 2012.

PESSÔA FILHO, D. M.; DENADAI, B. S. Mathematical basis for modeling swimmer power output in the front crawl tethered swimming: an application to aerobic evaluation. **Open Sports Sci J.** 7: 31-37, 2008.

PESSÔA FILHO, D. M.; GRECO, C. C.; DENADAI, B. S. Potência atada na máxima fase estável de lactato e índices do desempenho aeróbio de nado. **Rev Bras Med Esporte.** 20(5): 359-365, 2014.

PINNA, M.; MILIA, R.; ROBERTO, S.; MARONGIU, E.; OLLA, S.; LOI, A.; ORTU, M.; MIGLIACCIO, G. M.; TOCCO, F.; CONCU, A.; CRISAFULLI, A. Assessment of the specificity of cardiopulmonary response during tethered swimming using a new snorkel device. **J Physiol Sci.** 63: 7-16, 2013.

POOLE, D. C.; WILKERSON, D. P.; JONES, A. M. Validity of criteria for establishing maximal O₂ uptake during ramp exercise tests. **Eur J Appl Physiol.** 102: 403-410, 2008.

REINHARD, U.; MULLER, P. H.; SCHMULLING, R. M. Determination of anaerobic threshold by the ventilation equivalent in normal individuals. **Respiration.** 38:36-42, 1979.

REIS, J. F.; ALVES, F. B.; BRUNO, P. M.; VLECK, V.; MILLET, G. P. Oxygen uptake kinetics and middle distance swimming performance. **J Sci Med Sport.** 15: 58-63, 2012.

REIS, J. F.; MILLET, G. P.; MALATESTA, V.; ROELS, B.; BORRANI, F.; VLECK, V. E.; ALVES, F. B. Are oxygen uptake kinetics modified when using a respiratory snorkel? **Int J Sports Physiol Perform.** No prelo, 2011.

ROELS, B.; SCHMITT, L.; LIBICZ, S.; BENTLEY, D.; RICHALET, J-P; MILLET, G. Specificity of VO₂max and the ventilator threshold in free swimming and cycle ergometry: comparison between triathletes and swimmers. **Br J. Sports Med.** 39: 965-968, 2005.

ROUARD, A. H. Muscle Fatigue in Swimming (33-35). In Biomechanics and Medicine in Swimming XI. KJENDLIE, P-L.; STALLMAN, R. K.; CABRI, J. **Norwegian School of Sport Science**, Oslo, 2010.

ROUARD, A. H.; AUJOUANNET, Y. A.; HINTZ, F.; BONIFAZI, M. Isometric force, tethered force and power ratios as tools for the evaluation of technical ability in freestyle swimming (249-250). In: VILAS-BOAS JP, ALVES F, MARQUES A. (eds) Biomechanics and Medicine in Swimming X. **Rev Port Ciênc Desp.** 6, 2006.

SCHEUERMANN, B. W.; HOELTING, B. D.; NOBLE, M. L.; BARSTOW, T. J. The slow component of O₂ uptake is not accompanied by changes in muscle EMG during repeated bouts of heavy exercise in humans. **J of Physiol.** 531(1): 245-256, 2001.

SCHEUERMANN, B.W.; KOWALCHUK, J.M. Attenuated respiratory compensation during rapidly incremented ramp exercise. **Respiration Physiol** 114:227-238, 1998.

SOUSA, A.; FIGUEIREDO, P.; PENDERGAST, D.; KJENDLIE, P. L.; VILAS-BOAS, J. P.; FERNANDES, R. J. Critical evaluation of oxygen-uptake assessment in swimming. **Int J Sports Physiol Perf.** 9(2):190-202, 2014.

TANAKA, H.; MONAHAN, K. D.; SEALS, D.R. Age-Predicted Maximal Heart Rate Revisited. **J of the American College of Cardiology.** 37(1):153-6, 2001.
TERMIN, B.; PENDERGAST, D. R. Training using the stroke frequency-velocity relationship to combine biomechanical and metabolic paradigms. **J Swimming Res.** 14:9-17, 2000.

TOUSSAINT, H. M.; CAROL, A.; KRANENBORG, H.; TRUIJENS, M. J. Effect of fatigue on stroking characteristics in an arms-only 100-m front-crawl race. **Med and Scie in Sports and Exer.** 38(9):1635-1642, 2006.

TOUSSAINT, H. M.; HOLLANDER, A. P. Energetics of Competitive swimming. **Sports Med.** 18(6):384-405, 1994.

TOUSSAINT, H. M.; KNOPS, W.; GROOT, G. The mechanical efficiency of front crawl swimming. *Medicine and Science in Sports and Exercise.* 22(3):402-8, 1990.

TOKMAKIDIS, S. P.; LEGER, L. A.; PILIANIDIS, T. C. Failure to obtain a unique threshold on the blood lactate concentration curve during exercise. **Eur J Appl Physiol.** (77): 333-342, 1998.

UNNITHAN, V.; HOLOHAN, J.; FERNHALL, B.; WYLEGALA, J.; ROWLAND, T.; PENDERGAST, D. R. **Aerobic Cost in Elite Female Adolescent Swimmers.** **Int J Sports Med.** 30(3):194-9, 2008.

Van HANDEL, P. J.; KATZ, A.; MORROW, J. R.; TROUP, J. P.; DANIELS, J.T.; BRADLEY, P. W. Aerobic economy and competitive performance of U.S. elite swimmers. In Ungerechts BE, Wilke K, Reischle K. (eds.) *Swimming Science V.* Champaign, IL: **Human Kinetics.** 219-227, 1988.

WAGNER, P. D. New ideas on limitations to VO_2 max. **Exercise and Sport Sciences Reviews**. 28(1): 10-14, 2000.

WAKAYOSHI, K.; ACQUISTO, L. J. D.; CAPPAERT, J. M.; TROUP, J. P. Relationship between oxygen uptake, stroke rate and swimming velocity in competitive swimming. **Int J Sports Med**. (16): 19-23, 1995.

WAKAYOSHI, K.; IKUTA, K.; YOSIDA, T.; UDO, M.; MORITANI, T.; MUTOH, Y.; MIYASHITA, M. Determination and validity of critical velocity as an index of swimming performance in the competitive swimmer. **Eur J Appl Physiol**. (64): 153-157, 1992.

WASSERMAN, K.; HANSEN, J. E.; SUE, D. Y.; STRINGER, W.; WHIPP, B. J. Principles of Exercise Testing and Interpretation, 4th edn. **Lea & Febiger**, Philadelphia, 2004.

WHIPP, B. J.; WARD, S. A.; ROSSITER, H. B. Pulmonary O_2 uptake during exercise: conflating muscular and cardiovascular responses. **Med Sci Sports Exerc.**, 37:1574–1585, 2005.

WHIPP, B. J. Physiological mechanisms dissociating pulmonary CO_2 and O_2 exchange dynamics during exercise in humans. **Exp Physiol**. 92(2): 347-355, 2007.

WHIPP, B. J.; DAVIS, J. A.; WASSERMAN, K. Ventilatory control of the 'isocapnic buffering' region in rapidly-incremental exercise. **Respiration Physiol**, 76:357-368, 1989.

YEATER, R. A.; MARTIN, R. B.; WHITE, M. K.; GILSON, K. H. Tethered swimming forces in the crawl, breast and back strokes and their relationship to competitive performance. **J Biomech**. 14(8): 527–37, 1981.