

Efeito de um exercício extenuante sobre o padrão angular de pedalada: estudo preliminar

Effect of exhaustive exercise on the angular pedaling pattern: A preliminary study

Matheus Joner Wiest¹
Felipe Pivetta Carpes²
Mateus Rossato²
Carlos Bolli Mota¹

Resumo – Considerando aspectos biomecânicos como a cinemática, a fadiga pode ser caracterizada pela perda de eficiência em manter um padrão de movimento durante o exercício, tal como a técnica de pedalada. O propósito deste estudo preliminar foi investigar os efeitos do ciclismo extenuante, por 1h, em intensidade de 80% $\text{VO}_2\text{máx}$ sobre a técnica de pedalada. A técnica de pedalada foi avaliada por cinemática bidimensional em 4 ciclistas mountain-bike experientes. A hipótese do estudo foi de que mudanças angulares em resposta à fadiga poderiam ocorrer no tornozelo. Após o teste de consumo máximo de oxigênio, os ciclistas foram submetidos a um protocolo submáximo com intensidade de 80% $\text{VO}_2\text{máx}$. A cada 10 minutos eles eram filmados durante 10 ciclos de pedalada. As imagens foram capturadas do membro inferior direito sendo mensurados ângulos de quadril, joelho e tornozelo. Os procedimentos estatísticos envolveram teste de Shapiro-Wilk, ANOVA e post-hoc de Tukey HSD com nível de significância de 0,05. A análise estatística mostrou diferença significativa somente para o tornozelo após 40 minutos de exercício, com a amplitude de movimento aumentando de 20° no início, até 35° no final do exercício. Este resultado confirma a hipótese proposta de que o tornozelo seria a única articulação afetada. As características de movimento do tornozelo sugerem que esta articulação desempenha um papel importante para manter a técnica de pedalada e manter a carga de trabalho sustentando o exercício.

Palavras-chave: Cinemática; Fadiga; Ciclismo; Tornozelo.

Abstract – Considering biomechanical aspects such as kinematics, fatigue can be characterized as a loss of efficiency in maintaining a movement pattern, such as pedaling technique, during exercise. The objective of this preliminary study was to investigate the effects of 1-h exhaustive cycling exercise at intensity of 80% VO_2max on pedaling technique. The pedaling technique was evaluated in four skilled mountain-bike cyclists by 2D kinematics. The main hypothesis of this study was that angular changes in response to fatigue would occur mainly in the ankle joint. After achievement of maximal oxygen uptake (VO_2max), the cyclists were submitted to a submaximal protocol at intensity corresponding to 80% VO_2max for 1 h. The cyclists were filmed throughout 10 complete consecutive crank cycles at intervals of 10 min. Images were acquired from the right lower limb and the hip, knee and ankle joint angles were measured after kinematic processing. The Shapiro-Wilk test, ANOVA and post-hoc Tukey HSD test were used for statistical analysis, with the level of significance set at 0.05. Statistical analysis showed a significant difference only for ankle kinematics after 40 min of exercise, with an increase in the range of motion from 20° at the beginning of exercise to 35° at the end of exercise. This result confirms the hypothesis proposed and suggests that only the ankle joint was affected by the exercise. The characteristics of ankle movement suggest that this joint plays a compensatory role in an attempt to maintain the pedaling technique and to sustain the exercise workload.

Key words: Kinematics; Fatigue; Cycling; Ankle.

1 Universidade Federal de Santa Maria, Laboratório de Biomecânica, Santa Maria, RS, Brasil.

2 Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Laboratório de Pesquisa do Exercício, Porto Alegre, RS, Brasil.

Recebido em 18/12/07
Aprovado em 24/07/08

INTRODUÇÃO

Em uma temporada competitiva, um ciclista participará, em média, de 90 a 100 dias de competição, compreendendo desde corridas de um dia, uma semana ou até mesmo três semanas^{1,2}, além de todo o volume de treinamento inerente à preparação para estas competições. É sabido que estes ciclistas são submetidos a altas intensidades de esforço³, que são caracterizadas, principalmente, pela manutenção de uma grande produção de potência ao longo da prova⁴, podendo alcançar até 90% do VO_2 máximo^{5,6}. Da mesma forma, sabe-se que esses exercícios de alta intensidade conduzem à instalação de processos de fadiga muscular, extensivamente descrito pela literatura⁷⁻⁹. Logo, quando se avalia um exercício de endurance, no qual uma intensidade de trabalho severa é mantida por um tempo prolongado, fica claro que o processo de instalação da fadiga muscular e seus efeitos podem prejudicar o desempenho do atleta¹⁰.

A instalação deste processo de fadiga terá repercussões sobre o desempenho do atleta, sendo que, tradicionalmente, a fadiga será definida como a falha na produção de força ou potência, sendo caracterizada pelo declínio reversível na capacidade de geração de força muscular que culmina em falha momentânea¹¹. Sob o ponto de vista de variáveis biomecânicas, a fadiga pode ser caracterizada pela perda na eficiência dos padrões de movimento durante exercícios, como por exemplo, alterações da técnica da pedalada no ciclismo¹², que levam a perda da capacidade de gerar potência¹³.

As alterações que a fadiga causa nos padrões de movimento irão influenciar a técnica de pedalada, principalmente, em relação a articulação do tornozelo¹⁴⁻¹⁷. Segundo Pierson-Carey et al.¹⁸ e Ericson et al.¹⁹, a interface pé-pedal é o ponto firme de contato para a propulsão no ciclismo, e a posição do tornozelo pode afetar significativamente a transmissão da força gerada pelos músculos do membro inferior para o pé-de-vela, podendo o movimento do tornozelo ser influenciado também pela carga de trabalho. Comparando-se a técnica de pedalada entre ciclistas de diferentes modalidades através da aplicação de força no pedal, percebe-se que ciclistas mountain-bike (MTB) apresentam uma mecânica de pedalada mais uniforme (picos de força semelhantes) o que permite caracterizá-los como tendo uma técnica de pedalada mais eficiente do que ciclistas de outras modalidades, quando avaliados em laboratório²⁰. Isto pode, em parte, ser explicado pela maior exposição dos ciclistas MTB a subidas,

que pela constante produção de força, exigindo melhor aproveitamento da força gerada²⁰. Dingwell et al.¹⁵ Sanderson et al.¹⁶ citam que mecanismos de fadiga podem alterar os padrões de flexão dorsal do tornozelo em exercícios de intensidade máxima. Alterações como estas podem influenciar diretamente a técnica da pedalada e talvez ajudar a explicar a incapacidade de manter a produção de potência muitas vezes observada; no entanto, existem poucos estudos conclusivos sobre a influência da fadiga sobre a técnica da pedalada, principalmente, em relação a articulação do tornozelo.

O objetivo deste estudo preliminar foi avaliar, por meio da cinemática, alterações nos comportamentos angulares do membro inferior de ciclistas, submetidos a um protocolo de 1 hora de ciclismo simulado em laboratório sob uma intensidade correspondente a 80% do $VO_{2máx}$. A hipótese que o estudo visa estudar é de que alterações significativas ocorrem, principalmente, para a articulação do tornozelo durante o exercício prolongado, podendo estas ser relacionadas com a instalação de mecanismos de fadiga em resposta a exposição a um exercício extenuante.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O presente estudo foi aprovado pelo Comitê de Ética Local (número do protocolo 0068.0.243.000-07). Quatro ciclistas com mais de cinco anos de experiência em competições de mountain-bike foram avaliados. As características dos sujeitos estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Valores de massa corporal (kg), estatura (m), idade (anos), consumo de oxigênio (L/min) e potência correspondente a 80% do $VO_{2máx}$ para cada sujeito, e em média e desvio-padrão (DP) para o grupo.

Ciclistas	Massa corporal (kg)	Estatura (m)	Idade (anos)	VO_2 (L/min)	Potência (W) (80% $VO_{2máx}$)
1	79	1,90	18	4,39	283
2	74	1,72	22	4,56	269
3	73	1,85	20	5,3	212
4	88	1,85	25	7,94	373
Média	78,4	1,83	21	5,55	284
DP	6,9	0,08	3	1,64	66

Os ciclistas foram avaliados em duas oportunidades, separadas por um intervalo mínimo de 48 horas. Na primeira oportunidade, foram determinados os valores de $VO_{2máx}$ e potência máxima produzida durante um teste de carga incremental.

Este teste constituiu-se de um protocolo no qual os ciclistas deveriam pedalar entre 90 e 100 rpm, sob uma carga de trabalho inicial de 50 W, havendo um incremento de 50 W a cada 3 minutos (16,6 W a cada minuto), até a exaustão. O pico individual de VO_2 foi calculado pela média do VO_2 a cada 30s, e após, calculou-se a média dos dois maiores valores consecutivos de pico²¹. Na segunda oportunidade, os ciclistas foram submetidos a um protocolo de uma hora de exercício em ciclo ergômetro, em intensidade correspondente a 80% do $\text{VO}_{2\text{máx}}$ e cadência de pedalada preferida, mantida constante. Durante a semana que ocorreu a avaliação, todos os ciclistas tiveram sua dieta alimentar controlada, sendo submetidos a uma dieta normal mista isocalórica. O consumo de oxigênio foi monitorado continuamente ao longo do exercício.

Todos os testes foram realizados utilizando um ciclo ergômetro SRM Training System (SRM Science, Welldorf, Alemanha) modelo científico, com precisão de $\pm 0,5\%$ reportada pelo fabricante. O VO_2 foi mensurado de forma indireta por meio de um analisador de gases VMAX SERIES 229 (Sensor Medics, Yorba Linda, EUA). Os dados referentes à cinemática foram coletados em intervalos de 10 minutos (10 ciclos de pedalada), por meio de videogrametria bidimensional com taxa de amostragem de 180 Hz. A filmagem da pedalada seguiu a metodologia descrita por Carpes et al.¹⁷ para medidas angulares do membro inferior direito no ciclismo (Figura 1). A digitalização das imagens deu-se pelo reconhecimento automático de marcadores reflexivos de referência, fixados sobre pontos de referência anatômica para a cabeça do trocânter maior, epicôndilo lateral, calcâneo e V metatarso. Os cálculos de todas as variáveis cinemáticas selecionadas foram feitos por meio do Sistema Peak Motus (Peak Performance Technologies, Englewood, EUA).

O processamento dos ângulos articulares envolveu a filtragem das coordenadas espaciais brutas (filtro passa-baixa Butterworth de 4ª ordem, com frequência de corte de 6 Hz). Em um segundo momento, os dados angulares foram exportados para o software Origin Professional versão 6.0 (Microcal Inc., EUA) sendo analisados de acordo com a posição angular do pé-de-vela e tempo de realização do protocolo.

Para a análise estatística, os dados foram agrupados em média e desvio-padrão, com a normalidade da distribuição dos dados sendo confirmada pelo teste de Shapiro-Wilk. O comportamento angular de cada articulação para cada quadrante

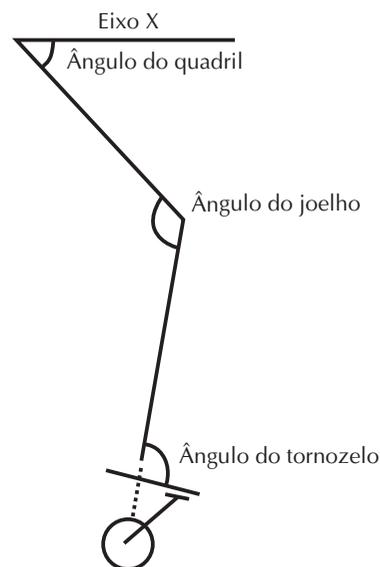


Figura 1. Ilustração dos ângulos articulares calculados.

do ciclo de pedalada foi comparado a cada 10 minutos, empregando-se a análise de variância de um fator (ANOVA one-way). Quando observadas interações, foi aplicado o teste post-hoc de Tukey HSD para verificar entre quais intervalos de tempo ocorreram alterações significativas. Os procedimentos estatísticos foram desenvolvidos no pacote estatístico Statistica 5.1 (Statsoft Inc, EUA) com nível de significância igual a 0,05.

RESULTADOS

As características do grupo estudado estão descritas na Tabela 1 (vide seção metodologia). O padrão angular de movimento é descrito em relação à revolução do pé-de-vela, e analisado em média para 10 revoluções consecutivas.

O comportamento angular do quadril não apresentou alterações significativas ao longo do exercício. A Figura 2 descreve o comportamento angular do quadril ao longo do ciclo do pé-de-vela. A amplitude angular apresentada pela coxa foi de, em média, $45 \pm 2^\circ$.

Assim como fora observado para o comportamento angular do quadril, também o comportamento angular do joelho (Figura 3) não apresentou alterações significativas, mantendo um padrão de movimentos similar ao longo do exercício.

De acordo com a hipótese formulada para este estudo, somente o comportamento angular do tornozelo (Figura 4) apresentou alterações estatisticamente significativas ($p < 0,05$) em resposta ao tempo de exercício, e a um possível processo de instalação de fadiga. Com o decorrer do exercício, a amplitude

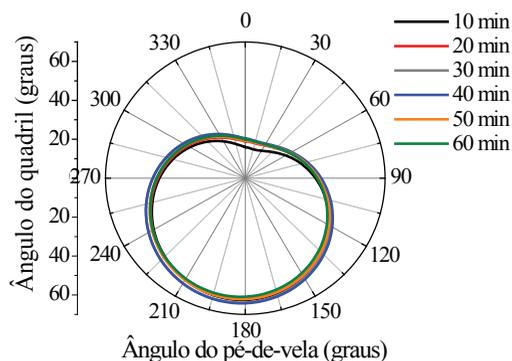


Figura 2. Comportamento angular do quadril durante o protocolo de exercício extenuante. Nenhuma alteração estatisticamente significativa foi encontrada ao longo do exercício para o ângulo do quadril.

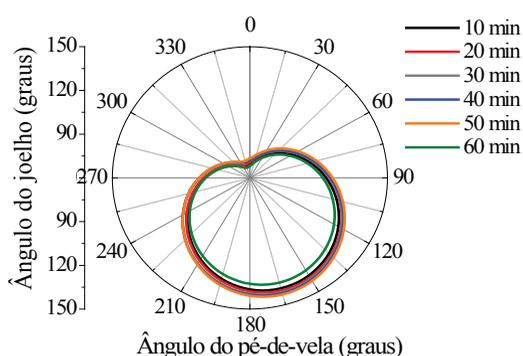


Figura 3. Comportamento angular do joelho durante o protocolo de exercício extenuante.

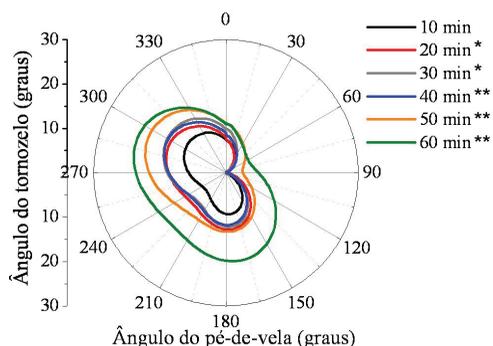


Figura 4. Comportamento angular do tornozelo durante o protocolo de exercício extenuante. Alterações estatisticamente significativas foram encontradas ao longo do exercício, indicando que o processo de fadiga afetou somente o padrão angular do tornozelo. * indica diferença estatisticamente significativa em relação aos minutos anteriores para a movimentação do tornozelo na fase de recuperação da pedalada (0-180°), enquanto ** indica diferença estatisticamente significativa em relação aos minutos anteriores para todo o ciclo de pedalada.

de movimento do tornozelo passou de cerca de 20° no minuto 10, para até 25° no minuto 40, e chegou ao máximo valor ao fim do protocolo, no minuto 60, com uma amplitude de 35° em média. Ao passo que o protocolo aproximou-se de seu final, principalmente, entre os minutos 20 e 40, as alterações

no padrão angular do tornozelo se tornaram significativas na fase de recuperação da pedalada (de 180° a 360° graus da revolução do pé-de-vela). A partir do minuto 40, o padrão angular apresentou diferença em todo o ciclo do pé-de-vela, apresentando diferença estatisticamente significativa em relação ao início do exercício (minuto 10), quando, teoricamente, os ciclistas estariam pedalando com uma menor influência dos mecanismos envolvidos com a instalação de fadiga.

DISCUSSÃO

O objetivo deste estudo foi verificar se um exercício extenuante, com uma hora de duração e uma intensidade correspondente a 80% do VO_{2max} afetaria a técnica de pedalada, analisada a partir de parâmetros cinemáticos. Observou-se que somente o comportamento angular do tornozelo se altera de maneira significativa com o decorrer do exercício. A característica de aumento na flexão dorsal do tornozelo, como a observada neste estudo, também tem sido relatada por outros autores em resposta a mecanismos de fadiga^{15,16}. No entanto, os estudos citados utilizaram protocolos de exercício com intensidade máxima, o que preserva a originalidade do presente estudo. Alterações no padrão de movimento do tornozelo podem ser os fatores precursores de mudanças na técnica de pedalada, na busca da manutenção da produção de potência durante o ciclismo.

As características angulares encontradas concordam com a literatura^{22,17}. Observa-se que a articulação do joelho dos ciclistas não apresenta extensão completa durante o ciclo de pedalada, característica que está ligada à capacidade de produção de força em função do ângulo de inserção muscular bem como minimização da compressão patelar³, e tem um padrão não alterado durante o exercício. O mesmo achado para a articulação do quadril é reportado. Considerando que o tornozelo apresenta a maior mobilidade ao longo da pedalada, por ter seus graus de liberdade combinados com a rotação do pedal, alterações no padrão angular do tornozelo podem refletir estratégias para manutenção da produção de potência.

De acordo com Dingwell et al.¹⁵ e Sanderson et al.¹⁶, a explicação encontrada para essas alterações na mecânica do movimento do tornozelo envolve uma mudança de estratégia muscular a fim de contrapor os mecanismos de fadiga e conseguir dar continuidade a realização da atividade, uma vez que a mudança nos ângulos articulares influenciará o comprimento e a excursão muscular, por consequ-

ência, afetando a produção de força²². A literatura propõe que a fadiga muscular é específica para os padrões de movimento envolvidos no exercício em questão¹¹. Durante um exercício em intensidade máxima, a contribuição relativa das fibras de contração rápida é aumentada quando comparada com exercícios de mesma velocidade, porém desempenhados em intensidades sub-máximas²³. Exercícios máximos realizados em baixas velocidades de contração podem causar, através de mecanismos de fadiga, uma quebra no sincronismo excitatório das unidades motoras, levando a perda na capacidade de manutenção dessa força por períodos prolongados²³. Ainda que neste estudo os ciclistas tenham sido submetidos a um protocolo com cadência de pedalada (velocidade de contração) constante, estas alterações no sincronismo excitatório, aliado à contribuição de diferentes tipos de fibras decorrentes de sintomas de fadiga, podem, hipoteticamente, alterar a técnica de pedalada utilizada pelo ciclista durante um protocolo submáximo. As mudanças no padrão de movimento ocorrem, justamente, na busca de manter a capacidade de produção de potência, talvez pela mudança, também, no padrão e magnitude de ativação dos músculos envolvidos.

Autores como Allen e Proske²⁴ afirmam que a fadiga muscular pode influenciar o senso de posição e movimento. Prilutsky et al.²⁵ complementam, sugerindo que alterações na ativação muscular podem explicar, em média, 80% da variação dos movimentos articulares. Com base nestas observações, pode-se inferir que parte das mudanças no padrão angular do tornozelo encontradas nos ciclistas estudados ocorra devido à fadiga, indicando que músculos específicos talvez sejam mais exigidos e por isso fatiguem precocemente. Esta fadiga precoce pode causar alterações nos padrões de ativação muscular, influenciando diretamente a coordenação necessária para a realização da técnica de pedalada correta, por fim, acarretando mudanças em aspectos cinemáticos. Neste caso, a articulação do tornozelo, pela maior mobilidade devido a conexão pé-pedal que permite o movimento combinado com a liberdade de movimento do eixo do pedal, permite ao atleta desempenhar estratégias musculares na busca de manter a capacidade de gerar potência para manutenção do exercício. Este estudo tem suas conclusões limitadas pelo pequeno grupo amostral, mas serviu para indicar que, considerando aspectos cinemáticos do membro inferior, durante um exercício que envolva processo de fadiga, somente a articulação do tornozelo apresentará alterações significativas.

CONCLUSÃO

Os ciclistas avaliados apresentaram alterações em sua técnica de pedalada no que diz respeito à cinemática do membro inferior durante um exercício extenuante. A articulação do tornozelo apresentou aumento na amplitude de movimento com o decorrer do exercício, o que sugere esta articulação como a mais pertinente em relação à cinemática para a avaliação da fadiga no ciclismo. Futuros estudos devem avaliar a atividade elétrica desses músculos, bem como a produção de força no pedal, para verificar se as alterações na amplitude de movimento do tornozelo refletem a manutenção da técnica de pedalada durante a fadiga.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Lucia A, Hoyos J, Chicharro JL. Physiology of professional road cycling. *Sports Med* 2001; 31(5):325-337.
2. Lucia A, Hoyos J, Santalla A, Earnest C, Chicharro JL. Tour de France versus Vuelta a Espana: which is harder? *Med Sci Sports Exerc* 2003;35(5):872-878.
3. Bentley DJ, McNaughton LR, Thompson D, Vleck VE, Batterham AM. Peak power output, the lactate threshold, and time trial performance in cyclists. *Med Sci Sports Exerc* 2001;33(12):2077-2081.
4. Chavarren J, Calbet JA. Cycling efficiency and pedalling frequency in road cyclists. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1999;80(6):555-563.
5. Fernández-García B, Pérez-Landaluce J, Rodríguez-Alonso M, Terrados N. Intensity of exercise during road race pro-cycling competition. *Med Sci Sports Exerc* 2000;32(5):1002-1006.
6. Neumayr G, Pfister R, Mitterbauer G, Gaenzler H, Sturm W, Eibl G, et al. Exercise intensity of cycle-touring events. *Int J Sports Med* 2002;23(7):505-509.
7. Billat VL, Richard R, Binse VM, Koralsztein JP, Haouzi P. The VO₂ slow component for a severe exercise depends on type of exercise and its not correlated with time to fatigue. *J Appl Physiol* 1998;85(6):2118-2124.
8. Whipp BJ, Ozyener F. The kinetics of exertional oxygen uptake: assumptions and inferences. *Med Sport* 1998;51:139-149.
9. Gaesser GA, Poole D. The slow component of oxygen uptake kinetics in humans. *Exerc Sport Sci Rev* 1996;24(1):35-70.
10. Jakeman PM. Amino acid metabolism, branched chain amino acid feeding and brain monoamine function. *Proc Nutr Soc* 1998;57(1):35-41.
11. McLester JR. Muscle contraction and fatigue. The role of adenosine 5'-diphosphate and inorganic phosphate. *Sports Med* 1997;(23):287-305.
12. Hausswirth C, Bigard AX, Guezennec CY. Relationship between running mechanics and energy cost of running at the end of a triathlon and a marathon. *Int J Sports Med* 1997;18(5):330-339.

13. Faria EW, Parker DL, Faria IE. The science of cycling: physiology and training. *Sports Med* 2005;35(4):285-312.
14. Martin JC, Brown NA. Joint-specific power production and fatigue during maximal cycling. *J Biomech* 2009;42(4):474-479.
15. Dingwell JB, Joubert JE, Diefenthaler F, Trinity JD. Changes in muscle activity and kinematics of highly trained cyclists during fatigue. *IEEE Trans Biomed Eng* 2008;55(11):2666-2674.
16. Sanderson DJ, Black A. The effect of prolonged cycling on pedal forces. *J Sports Sci* 2003;21(3):191-199.
17. Carpes FP, Dagnese F, Bini RR, Diefenthaler F, Rosato M, Mota CB, et al. Características cinemáticas em ciclistas competitivos de diferentes modalidades. *Rev Port Cie Desp* 2006;6(1):7-14.
18. Pierson-Carey CD, Brown DA, Dairaghi CA. Changes in resultant pedal reaction forces due to ankle immobilization during pedaling. *J App Biomech* 1997;13(3):334-346.
19. Ericson MO, Nisell R, Nemeth G. Joint motions of the lower limb during ergometer cycling. *J Orthop Sports Phys Therapy* 1988;9(9):273-278.
20. Broker JP, Crawley JD, Coughlin KD. Pedaling mechanics differences across cycling disciplines: observations over 10 years of testing. *Med Sci Sports Exerc* 2002;34(5), supplement 1, S90.
21. Gardner A, Osborne M, D'Auria S, Jenkins D. A comparison of two methods for the calculation of accumulated oxygen deficit. *J Sports Sci* 2003;(21):155-162.
22. Herzog W, Guimarães AC, Anton M G, Carter-Erdman K A. Moment-length relations of rectus femoris muscles of speed skaters/cyclists and runners. *Med Sci Sports Exerc* 1991;(23):1289-1296.
23. Spendiff O, Longford N T, Winter E M. Effects of fatigue on the torque-velocity relation in muscle. *Br J Sports Med* 2002;(36):431-435.
24. Allen TJ, Proske U. Effect of muscle fatigue on the sense of limb position and movement. *Exp. Brain Res* 2005;(17):1-9.
25. Prilutsky BI, Gregory RJ. Analysis of muscle coordination strategies in cycling. *IEEE Trans on Rehab Engin* 2000;8(3):362-370.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a equipe do GEPEC, Grupo de Estudo e Pesquisa em Ciclismo, pelo auxílio na fase de coleta de dados e também aos sujeitos deste estudo que foram submetidos a extensivos dias de avaliação, controle de dieta e treinamento ao longo de um projeto maior onde este estudo esteve incluso.

Endereço para correspondência

Felipe Pivetta Carpes
 UNIPAMPA – Campus Uruguaiana
 BR 472 – Km 592 – Caixa Postal 118
 97500-970 – Uruguaiana, RS. Brasil
 E-mail: felipecarpes@gmail.com